

Yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenoton menetelmäselvitys raportti

28.04.2023



Ympäristöministeriö
Miljöministeriet
Ministry of the Environment

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

Yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenoton menetelmäselvitys raportti

Toimeksiantaja **Ympäristöministeriö**
Päivämäärä **28.04.2023**
Laatija **Ramboll Finland Oy**

Tiivistelmä

Ympäristöministeriö on tukenut yhdyskuntien jätevesien ravinteiden kierrätykseen liittyviä hankkeita yli kymmenen vuotta, ja tavoitteena on saavuttaa läpimurto ravinteiden kierrätyksessä. Yhdyskuntien jätevesien sisältämät ravinteet, fosfori ja typpi, ovat olleet kiinnostuksen kohteena korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita maataloudessa. Ravinteita on mahdollista hyödyntää myös teollisuudessa. Jotta jätevesien, jätevesilietteiden ja jätevesilietetuhkan sisältämät ravinteet saadaan hyödynnettyä, tulee ne erotella soveltuvilla talteenotto menetelmillä. Tämän menetelmäselvityksen tarkoituksena on päivittää ja fokusoida ravinteiden talteenottoon liittyviä tietoja.

Selvityksen alussa on tarkasteltu jätevesien, jätevesilietteiden ja jätevesilietetuhkan ravinteiden kierrätykseen liittyviä taustatietoja. Näitä ovat muun muassa fosforin ja typen alkuperä sekä markkina Suomessa, kierrätysravinteiden soveltuvuus lannoitetuotantoon, jätevesilietteiden sisältämien ravinteiden hyödyntämisen nykytilanne, jätevesilietteen hyötykäyttöön liittyvät lainsäädännön uudistukset sekä Suomen infrastruktuuri ja ympäristöolosuhteiden vaikutukset.

Menetelmäselvityksen tarkempaan tarkasteluun valittiin teknisesti kypsempiä menetelmiä (TRL > 6-7) ja joiden katsottiin soveltuvan Suomen olosuhteisiin ja toimintaympäristöön. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta kehitteillä olevia menetelmiä kuvattiin lyhyesti. Tarkempaan tarkasteluun valikoituivat seuraavat talteenottomenetelmät: struviitin saostus, strippaus, kalvomenetelmät, NPHarvest, RAVITA, fosforin talteenotto vivianiittina, pyrolyysi, poltto ja märkäkemialliset talteenottomenetelmät tuhkasta. Kyseiset menetelmät on kuvattu selvityksessä ja niiden teknillistaloudellisuutta on analysoitu. Menetelmiä arvioitiin karkealla tasolla kestävän kehityksen näkökulmasta. Selvityksen lopussa on esitetty suosituksia ja toimenpiteitä jätevesiperäisten ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen edistämisen ohjausekoina.

Menetelmien kustannuksia arvioitiin yhteismitallistettuna 100 000 asukkaan jätevesikuormitusta vastaavalle kokoluokalle. Tarkastelussa käytettiin menetelmien kehittäjiltä, laitetoimittajilta ja kirjallisuudesta saatuja tietoja. Eri menetelmien kustannustietoihin liittyy epävarmuuksia ja vertailukustannuksien tarkkuustaso on luokkaa ± 50 %. Vertailukustannuksissa on huomioitu myös lietteen jatkokäsittelyn kustannukset.

Vertailukustannuksien osalta potentiaalisimmat fosforin talteenottomenetelmät ovat struviitin saostus, vivianiitin erotus magneettisesti sekä poltto ja märkäkemiallinen fosforin talteenotto tuhkasta. Typen osalta talteenotto haihdutuksen ja strippauksen yhdistelmällä on samalla kustannustasolla. Vielä kehitteillä olevien menetelmien NPHarvest:in ja RAVITA:n kustannukset olivat muihin menetelmiin verrattuna korkeammat. Ravinteiden talteenotosta muodostuu lisäkustannuksia, ja jotta se olisi kannattavaa liiketoimintaa, tulee ravinteiden talteenottoa tukea ja luoda markkinanäkymästä pitkäkestoisesti ennustettava lainsäädännön keinoin.

Avainsanat: yhdyskuntajätevedet, jätevesiliete, jätevesilietetuhka, ravinteiden kierrätys, ravinteiden talteenottomenetelmät, fosforin talteenotto, typen talteenotto

Sammanfattning

Det finska miljöministeriet har i mer än tio år stött projekt relaterade till återvinning av näringsämnen från kommunalt avloppsvatten i syfte att uppnå ett genombrott i återvinningen av näringsämnen. Det finns intresse för användning av fosfor och kväve, näringsämnen som finns i kommunalt avloppsvatten, som ersättning för oorganiska gödselmedel i jordbruket. Dessa näringsämnen kan även användas i industriella tillämpningar. För att återvinna näringsämnena från i avloppsvatten, avloppsslam och avloppsslamaska, måste de separeras genom lämpliga tekniska metoder. Syftet med denna metodstudie är att uppdatera och fokusera informationen om utvinning av näringsämnen.

Rapporten inleds med en genomgång av bakgrundsinformationen om återvinning av näringsämnen från avloppsvatten, avloppsslam och avloppsslamaska. Dessa inkluderar bl. a. ursprunget och marknaden för fosfor och kväve i Finland, de återvunna näringsämnenas lämplighet för gödselproduktion, det nuvarande tillstånd för kretslopp av näringsämnen från avloppsslam, lagstiftningsreformer som rör utnyttjande av utnyttjande av avloppsslam, den finska infrastrukturen och miljöförhållandenas inverkan.

Metoder som är tekniskt mer mogna (TRL > 6-7) och som ansågs vara lämpliga för de finländska förhållandena och operativa miljön valdes för mer exakta analys i denna metodstudie. Metoder under utveckling beskrevs kortfattat på grund av litteraturstudien. De följande återvinningsmetoder valdes ut för vidare analys: struvitutfällning, strippning, membranmetoder, NPHarvest, RAVITA, återvinning av fosfor i form av vivianit, pyrolys, förbränning och våtkemiska utvinningsmetoder från aska. Dessa metoder har beskrivits i studien och deras tekniska och ekonomiska genomförbarhet har analyserats. Metodernas hållbarhet bedömdes på en grov nivå. Rapporten avslutas med rekommendationer och åtgärder för att främja återvinning och återanvändning av näringsämnen från avloppsvatten.

För att jämföra kostnader mellan olika metoder, kostnader uppskattades som totalkostnader för ett reningsverk för 100 000 pe. Beräkningar är baserat på information från metodutvecklare, utrustningsleverantörer och litteratur. På grund av osäkerheter i metodernas kostnadsdata, jämförbara kostnadernas noggrannhetsnivå är i storleksordningen $\pm 50\%$. Kostnaderna för ytterligare slambehandling har även beaktats.

När det gäller jämförbara kostnader, är de mest potentiella metoderna för fosforåtervinning struvitutfällning, magnetisk separation av vivianit, förbränning och våtkemisk fosforutvinning. När det gäller kväve ligger återvinning genom en kombination av avdunstning och strippning på samma kostnadsnivå. NPHarvest och RAVITA, som fortfarande är under utveckling, ligger på högre kostnadsnivå än de andra metoderna. Återvinning av näringsämnen medför ytterligare kostnader, och för att den ska bli en lönsam verksamhet måste den stödjas finansiellt och marknadsutsikterna måste göras förutsägbara på lång sikt genom lagstiftning.

Nyckelord: kommunalt avloppsvatten, avloppsslam, aska från avloppsslam, återvinning av näringsämnen, metoder för återvinning av näringsämnen, återvinning av fosfor, återvinning av kväve

Abstract

The Ministry of the Environment in Finland has been supporting nutrient recycling projects in municipal wastewater for over ten years, with the aim of achieving a breakthrough in nutrient recycling. The nutrients contained in municipal wastewater; phosphorus and nitrogen, have been of interest as a substitute for inorganic fertilizers in agriculture. Nutrients can also be used in industrial applications. In order to utilize the nutrients contained in wastewater, sewage sludge and sewage sludge ash, they need to be separated by appropriate recovery methods. The purpose of this methodological study is to update and focus information on nutrient recovery.

The report starts with a review of the background information on nutrient recycling from wastewater, sewage sludge and sewage sludge ash, such as the origin and market of phosphorus and nitrogen in Finland, the suitability of recycled nutrients for fertilizer production, the current status of nutrient recovery from sewage sludge, legislative reforms related to the utilization of sewage sludge, the Finnish infrastructure and the impact of environmental conditions.

Methods that are technically more mature (TRL > 6-7) and considered to be suitable for the Finnish conditions and operational environment, were selected for further analysis of the methodological study. Based on the literature review, the methods under development were briefly described. The following recovery methods were selected for further review: struvite precipitation, stripping, membrane methods, NPHarvest, RAVITA, phosphorus recovery as vivianite, pyrolysis, incineration, and wet chemical recovery methods from ash. These methods have been described in the study and their technical and economic feasibility analyzed. Sustainability of the methods was assessed at a general level. The report concludes with recommendations and measures to promote the recovery and recycling of nutrients from wastewater.

The costs of the methods were made comparable by estimating them on a total cost basis for a treatment plant of 100 000 PE. The estimations were based on information from method developers, equipment suppliers, and literature. Due to uncertainties in the cost data of the different methods, the level of accuracy of the comparable costs is $\pm 50\%$. The costs of further sludge treatment have also been considered.

In terms of comparable costs, the most potential phosphorus recovery methods are struvite precipitation, magnetic separation of vivianite, and combustion and wet chemical phosphorus recovery method. For nitrogen, recovery by a combination of evaporation and stripping is at the same cost level. NPHarvest and RAVITA, which are still under development, had higher cost levels compared to the other methods. Nutrient recovery incurs additional costs and, in order to be a profitable business, nutrient recovery needs to be supported financially and the market outlook needs to be made predictable in the long term through legislation.

Keywords: municipal wastewater, sewage sludge, sewage sludge ash, nutrient recycling, nutrient recovery methods, phosphorus recovery, nitrogen recovery

Esipuhe

Tässä menetelmäselvityksessä on arvioitu fosforin ja typen talteenottomenetelmiä jätevedestä, jätevesilietteestä ja jätevesilietetuhkasta viimeisimmän tiedon mukaan. Erityisesti arvioitiin eri menetelmien teknistä kypsyyssastetta, soveltuvuutta Suomeen, taloudellisia toimintaedellytyksiä sekä lopputuotteen käytettävyyttä. Selvityksen päivittää ja fokusoida ravinteiden talteenottoon liittyviä tietoja.

Selvityksen toimeksiantajana on Ympäristöministeriö ja selvityksen on laatinut monialainen työryhmä jätevesi- ja kiertotalousasiantuntijoita Ramboll Finland Oy:stä. Rambollin kollegat Tanskasta ja Norjasta ovat tukeneet työryhmää selvityksen tekemisessä. Selvityksen laatimista ohjasi asiantuntijaohjausryhmä, johon kuuluivat Ari Kangas (Ympäristöministeriö), Riikka Malila (Ympäristöministeriö), Paula Lindell (Vesilaitosyhdistys), Kristian Sahlstedt (HSY) ja Anna Mikola (Aalto yliopisto).

Työryhmä kiittää kaikkia selvityksen tekemiseen ja haastatteluihin osallistuneita heidän aktiivisesta panostuksestaan.

Huhtikuussa 2023
Ramboll Finland Oy

Sisältö

1.	Johdanto	2
2.	Tavoitteen asettelu	3
3.	Fosforin ja typen alkuperä ja markkina Suomessa	3
3.1	Fosforin alkuperä	5
3.2	Typen alkuperä	6
3.3	Fosforin ja typen tarve lannoitetuotannossa ja markkinatilanteen kehitys	7
4.	Kierrätysravinteiden soveltuvuus lannoitetuotantoon	9
5.	Jätevesilietteiden sisältämien ravinteiden hyödyntämisen nykytilanne	12
5.1	Puhdistamolietteen käsittelymenetelmien osuudet Suomessa	12
5.2	Puhdistamolietteen ja sen sisältämien ravinteiden hyötykäytön nykytilanne Suomessa	15
5.3	Jätevedenpuhdistamoiden ravinnevirrat	16
5.4	Ravinteiden talteenoton potentiaali	19
5.5	Kierrätysravinteiden talteenottolaitosten kansainvälinen tilanne	21
5.6	Tutkimus- ja kehitystoiminta ravinteiden talteenoton suhteen	21
5.7	Haastatteluiden yhteenveto	22
6.	Jätevesilietteen hyötykäyttöön liittyvät lainsäädännön uudistukset	23
7.	Suomen infrastruktuurin ja ympäristöolosuhteiden vaikutukset	25
7.1	Etäisyydet ja logistiikka	26
7.2	Ympäristöolosuhteet	26
8.	Tekninen menetelmäselvitys	27
8.1	Johdanto	27
8.2	Talteenottomenetelmät	28
8.3	Yhteenveto	56
9.	Teknillistaloudellinen kokonaisanalyysi valittujen prosessien osalta	59
9.1	Analyysin lähtökohdat ja lähestymistapa	59
9.2	Kustannustarkastelu	61
9.3	Yhteenveto	65
10.	Kestävän kehityksen näkökulmat	67
10.1	Kestävän kehityksen globaalit ja kansalliset tavoitteet	67
10.2	Kestävä kehitys lannoitetuotannossa	68
10.3	Ravinteiden talteenottomenetelmät kestävän kehityksen näkökulmasta	69
11.	Suosituksien ja toimenpiteiden jätevesiperäisten ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen edistämisen ohjauskeinoiksi	70
12.	Yhteenveto	73
13.	Lähteet	77

1. Johdanto

Ravinteiden kierrätysohjelmaa (Raki) on toteutettu Ympäristöministeriön toimesta vuodesta 2012. Ohjelma avustaa ravinteiden kierrätyksen hankkeita. Toimeenpanoa seurasi vuoteen 2020 asti ravinteiden kierrätyksen seurantaryhmä, johon kuului ympäristöministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, valtiovarainministeriö, työ- ja elinkeinoministeriö ja Business Finland. Seurantaryhmä loi vision ravinteiden kierrätyksestä vuoteen 2030: ”*Ravinteiden kierrätyksessä on tapahtunut läpimurto, päästöt ympäristöön ovat pienet ja ravinteet kiertävät tehokkaasti. Vesistöihin karanteita ravinteita palautetaan kiertoon ja tuontiravinteiden määrä on pieni. Ravinteiden kierrätys on synnyttänyt uutta liiketoimintaa.*”

Vuodesta 2020 ympäristöministeriö on kohdistanut avustuksia erityisesti yhdyskuntien jätevesien ravinteiden kierrätykseen ja eri toimijoiden yhteishankkeille, jotka edistävät ravinteiden kierrätystä. Lisäksi Suomen kestävä kasvun ohjelmaan sisältyy Euroopan Unionin elpymis- ja palautumistukivälineen rahoitusta ravinteiden kierrätykseen liittyviin hankkeisiin vuosina 2021–2025.

Venäjän hyökkäys Ukrainaan on entisestään vauhdittanut kiinnostusta kierrätysravinteiden hyödyntämiseen, sillä ravinneomavaraisuuden ja huoltovarmuuden rooli yhteiskunnassa on korostunut. Varautumisen ministerityöryhmä linjasikin maaliskuussa 2022 maatalouden tukikokonaisuudesta, jonka tavoitteena on helpottaa maatalouden kustannuskriisiä, turvata huoltovarmuutta sekä vauhdittaa energiaomavaraisuuden kasvattamista ja siirtymää pois fossiilisista tuotantopanoksista. Tukikokonaisuus sisältää noin 45 miljoonan euron määrärahan yhdyskuntien jätevesien ravinne- ja energiapotentiaalin hyödyntämiseen. Tätä selvitystä hyödynnetään määrärahojen kohdistamisessa sekä tulevan puhdistamolietestategian suunnittelussa.

Ravinteiden kierrätys jätevesistä

Ympäristöministeriön mukaan jätevesien ravinteiden kierrätys tapahtuu neljässä vaiheessa.

Ensimmäinen vaihe on käynnissä, ja siinä ravinteet kiertävät hygienisoidun jätevesilietteen hyötykäytön myötä nykyisen lainsäädännön puitteissa.

Toisessa vaiheessa jätevesilietettä prosessoidaan menetelmissä, joilla ravinteita saadaan kiertoon spesifisemmin talteen otettuina ja turvallisempina valmisteina.

Kolmannessa vaiheessa itse jätevedenkäsittelyä modifioidaan siten, että siitä tulee kiertotalousajattelun mukaisesti resurssien talteenotto-prosessi, joka käyttää jätevettä raaka-aineenaan vesiensuojelun tavoitteiden mukaista jätevedenpuhdistusta unohtamatta.

Neljäs vaihe perustuu ravinnerikkaiden jätevesijakeiden syntypaikkaerotteluun, mikä edellyttää merkittäviä muutoksia koko jätevesi-infrastruktuuriin ja voi nähtävissä olevassa tulevaisuudessa soveltua käyttöön alueellisesti ja tapauskohtaisesti.

Tämä selvitys keskittyy erityisesti toisen vaiheen menetelmiin, joissa jätevesilietteen käsittelyä modifioidaan niin, että saadaan erotettua ja jalostettua lannoitevalmisteina käyttökelpoisia ravinnepitoisia jakeita. Lisätietoa Raki-ohjelmasta ja toteutetuista hankkeista löytyy ympäristöministeriön internetsivuilta.

2. Tavoitteen asettelu

Tämän menetelmäselvityksen tavoitteena on tutkia menetelmiä, joilla saadaan erotettua ja otettua talteen jäteveden sisältämiä ravinteita ensisijaisesti lannoitevalmistekäyttöä varten. Selvityksessä tarkastellaan menetelmien teknistä valmiusastetta (TRL), käyttöönottavuutta Suomen vallitsevassa infrastruktuurissa ja ympäristöolosuhteissa, menetelmän taloudellisia toimintaedellytyksiä vallitsevassa markkinatilanteessa sekä erotetun ja talteen otetun jakeen käytettävyyttä lannoitevalmisteenä. Ravinteet, joita tässä selvityksessä tarkastellaan, on rajattu fosforiin sekä typpeen. Maanparannusvaikutus, sisältäen hiilen ja orgaanisen aineen vaikutukset, on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle.

Selvitys sisältää suosituksia yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen edistämisen ohjauskeinoiksi sekä teknisen käyttöönottovalmiuden edistämiseksi. Erityisesti kiinnitetään huomiota menetelmiin, jotka voisivat olla nopeasti käyttöönotettavissa jäteveden, jätevesilietteen tai lietteenkäsittelyssä muodostuvien jakeiden sisältämän fosforin ja/tai typen talteenottoon joko puhdistamokohtaisesti tai puhdistamoiden keskitetyssä yhteenliittymässä.

Selvitys päivittää ja fokusoii tarkemmin tietoja, joita on esitetty aiemmissa ravinteiden kierrätykseen keskittyneissä raporteissa, kuten Suomen ympäristökeskuksen raportti (2021) sekä Vesilaitosyhdistyksen monistesarjan julkaisut nro 56 (2019) ja nro 42 (2016). Selvityksessä on myös huomioitu kansainvälisiä selvityksiä, tietokoosteita sekä -alustoja. Lisäksi Ramboll on hyödyntänyt kansainvälistä asiantuntijaverkostoaan, ja selvityksessä on hyödynnetty kokemusta vastaavanlaisista tutkimuksista muissa pohjoismaissa.

Selvityksen päätavoitteena on kuvata prosessien tekninen valmiusaste, käyttöönottovalmius ja taloudellisuus. Lisäksi on huomioitu ravinnetuotteen (lannoite) käytettävyyttä sisältäen lopputuotteen käyttökelpoisuuden (levitettävyyttä, liukoisuutta ja käyttökelpoisuutta kasveille), haitta-aineet, prosessin tekninen toimintavarmuus, lainsäädännön mukaisuus sekä energia-aspekti taloudellisuusnäkökulmasta.

3. Fosforin ja typen alkuperä ja markkina Suomessa

Kun puhutaan ravinteista, tarkoitetaan kemiallisia aineita, joita eliöt, esimerkiksi kasvit tarvitsevat kasvaakseen. Kasveille välttämättömiä ravinteita on tunnistettu 16, ne ovat erilaisia alkuaineita, joita ei voida korvata millään muulla ravinteella. Nämä ravinteet voidaan jakaa eri luokkiin, mutta kaikki ravinteet ovat elintärkeitä kasveille sillä yksittäisen ravinteen puutos haittaa kasvin optimaalista kasvamista.

Yleensä pääravinteisiin luetaan hiili, happi, vety, typpi, fosfori ja kalium, joita kasvit tarvitsevat suhteellisen paljon kasvaakseen. Sivuravinteisiin luetaan rikki, kalsium sekä magnesium ja hivenravinteisiin boori, kupari, sinkki, mangaani, rauta, kloridi ja molybdeeni. (RE-maatila, 2022). Kasvit saavat näitä ravinteita eri lähteistä, ja lähteet voivat olla joko orgaanisia tai epäorgaanisia. Yleisesti ottaen maataloudessa kasvit saavat kerättyä hiiltä, happea ja vetyä ilmasta, mutta erityisesti typpeä, fosforia ja kaliumia annetaan kasveille lannoitteen muodossa. Nämä kolme alkuainetta muodostavat yleisesti käytetyn lyhenteen NPK, jota käytetään usein lannoitteiden yhteydessä.

NPK-ravinteista kasvit tarvitsevat typpeä eniten, ja se on korvaamaton maaperän hedelmällisyydelle ja laadulle (Reeves, 1997). Typen puute on myös yleisin rajoittava ravinnetekijä viljelyskasvin tuottavuudessa globaalisti (Smil, 1999). Ilmassa olevaa typpeä kasvit pystyvät käyttämään vain vähän, joten typpeä valmistetaan teollisesti. Typen teollinen valmistusprosessi kuitenkin aiheuttaa päästöjä ja on energiantensiivistä; typen valmistuksen vähentäminen onkin tunnustettu keinoksi vähentää ilmastopäästöjä (Menegat ym. 2022, IPCC 2007; Bellarby 2008).

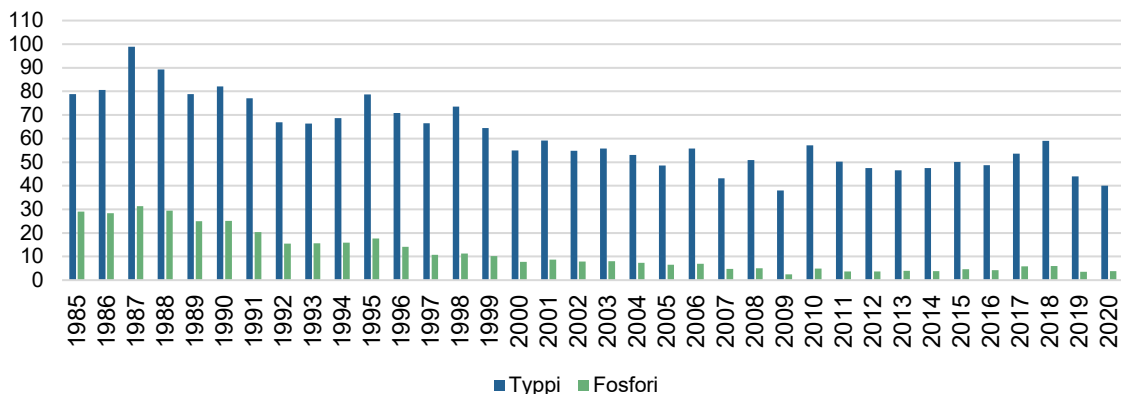
Fosfori on uusiutumaton luonnonvara, joka esiintyy mineraalina ja jota louhitaan apatiittikaivoksista. Fosfori on globaalilla tasolla toiseksi yleisin rajoittava ravinnetekijä maatalouden alkutuotannossa (Cordell ym., 2009). Koska fosforin määrä on rajallista ja sen rooli kasvituotannossa on äärimmäisen kriittinen, fosforin riittävyyden varmistaminen myös tulevaisuudessa on tunnustettu globaalilla tasolla tärkeäksi tavoitteeksi. Esimerkiksi Euroopan unioni on linjannut fosforin tarjonnan strategisesti kriittiseksi tekijäksi jo vuonna 2013 (Euroopan komissio, 2013).

Fosforin ja typen käyttöä tulee kontrolloida, sillä ylimääräisten ravinteiden, erityisesti typen ja fosforin liiallinen käyttö voi aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä ja kasvihuonekaasujen muodostumista. Ravinnetaseet on kehitetty optimoimaan ravinteiden käyttöä. Ne ovat laskelmia, jotka ottavat huomioon tarvittavan ravinteiden optimaalisen määrän, jolloin viljelyalueet voidaan lannoittaa tehokkaasti mahdollisimman pienin ympäristövaikutuksin.

Fosforin ja typen optimaalinen saanti kasveille taataan siis lannoittamalla, ja onnistunut lannoittaminen onkin merkittävässä asemassa tuottoisassa maataloustuotannossa. Erityisen tärkeää on, että ravinteita on oikea määrä, lannoittaminen on tehty oikeaan aikaan ja kohdistettu oikeaan paikkaan. (MTK 2017).

Suomessa on kiinnitetty jo pitkään huomiota fosforin ja typen käyttöön ravinteina. Vuodesta 1990 vuoteen 2020 Suomen fosforitase laski 85 % prosenttia ja typpitase 51 %. Ravinteiden käyttöä on siis pystytty tehostamaan, ja erityisesti fosforin käyttöä on pystytty optimoimaan ja sitä kautta vähentämään. Maanviljelyssä seurataan ravinteiden käyttöä peltotaseiden avulla, jotka indikoivat kuinka paljon ravinteita pellolle tulee (esim. lannoitteet) ja poistuu (esim. sadonkorjuu). Oheisessa kuvaajassa on esitetty fosfori- ja typpitaseet Suomessa kiloina per hehtaari (LUKE 2022a). Positiivinen luku indikoi ravinneylijäämää per hehtaari, jolloin ravinteita tulee enemmän peltoon kuin niitä poistuu.

Fosfori- ja typpitaseet Suomessa vuosittain (kg/ha)



Kuvaaja 1. Fosfori ja typpitase Suomessa. Lähde: LUKE 2022a

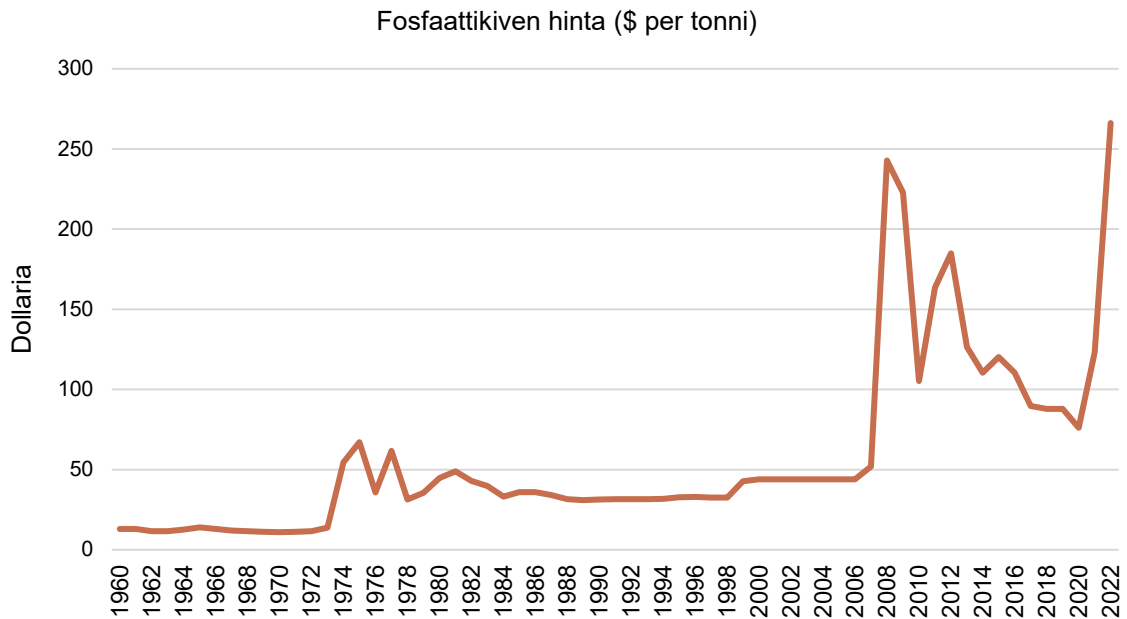
Suomessa käytetään fosforia ja typpeä pääasiallisesti maataloudessa lannoitevalmisteissa, metsätaloudessa lannoitevalmisteissa, viherrakentamisessa ja kalataloudessa. Fosforin kokonaiskulutus Suomessa oli noin 33 819 tonnia ja typen 234 630 tonnia vuonna 2016 (Marttinen et al. 2017). Suurin osa (yli 90 %) kulutetusta fosforista ja typestä käytettiin maatalouden lannoitteissa. Tästä syystä on luonnollista tutkia yhdyskuntien jätevesien kierrätysravinteiden soveltuvuutta nimenomaan maatalouskäyttöön. Jätevesilietteiden metsälevitys on kiellettyä (Ruokavirasto, 2022d).

Marttinen ym. (2017) arvioivat epäorgaanisten lannoitteiden osalta fosforin määräksi 11 300 tonnia ja kierrätysravinteita sisältävien fosforilannoitevalmisteiden osuudeksi 1 700 tonnia per vuosi. Epäorgaanisissa lannoitteissa typpeä käytettiin 148 000 tonnia ja kierrätysravinteita sisältäviä typpilannoitteita käytettiin noin 4 000 tonnia. Nämä luvut eivät sisällä lantaa, jota käytetään myös lannoitteena, ja jonka arvioitu kulutus oli 19 300 tonnia vuonna 2016 ja vastasi noin 60 % kokonaisfosforitarpeesta. Näin ollen siis noin 13 % maatalouden lannoitteissa (pl. lanta) käytetystä fosforista tulee kierrätysravinteista ja 87 % epäorgaanisista lähteistä. Typen osalta vastaavasti noin 2,6 % tulee orgaanisista lähteistä ja yli 97 % epäorgaanisista lähteistä. Kuten mainittu, lanta sisältää fosforia ja sitä käytetään maatalouden lannoitteena. Tässä selvityksessä rajausta sisältää ainoastaan yhdyskuntien jätevesien kierrätysravinteet, jotka voisivat tulevaisuudessa korvata epäorgaanisia ravinteita.

LUKE (2023) arvioi että viljelykasvien fosforilannoitustarve oli vuonna 2020 noin 23 300 tonnia, ja lannan fosforia syntyi noin 15 200 tonnia, eli 65 % kokonaistarpeesta. Yhdyskuntien jätevesilietteiden arvioitiin sisältävän kierrätettävissä olevaa fosforia noin 4 000 tonnia vuosittain, joka vastaa noin 17 % kokonaistarpeesta.

3.1 Fosforin alkuperä

Suomessa käytettävä fosfori tulee pääsääntöisesti apatiittikaivoksista. Suurimmat fosforin tuottajat ovat Marokko, Kiina, Algeria, Yhdysvallat sekä Venäjä. Suomessa sijaitsee EU:n ainoa apatiittikaivos, joka on ollut toiminnassa vuodesta 1980. Apatiitista saadaan louhittua puhdasta fosforia, jota käytetään lannoitetuotannossa. Raaka-aineena louhittu fosfori on kuitenkin rajallista, ja erityisesti viimeaikaisten geopoliittisten jännitteiden vuoksi Suomessa halutaan jatkaa ravinteiden, kuten fosforin ja typen, kierrätysmahdollisuuksien tutkimista laajalti. (Ympäristöministeriö 2022). Fosforin alkuperästä ja riittävydestä on kirjoitettu aikaisemmin muun muassa Heckenmüller ym. (2014) ja USGS (2021), ja arviot sen riittävydestä vaihtelevat suuresti (kymmenistä vuosista satoihin vuosiin). Fosfaattikiven hinta vaikuttaa väkilannoitteiden hintoihin. Fosfaattikiven hinta on vaihdellut merkittävästi vuodesta 2007, viimeisimpänä käänteenä raju hinnannousu Venäjän hyökättyä Ukrainaan keuhällä 2022 (Kuvaaja 2).



Kuvaaja 2. Fosfaattikiven hinta dollaria per tonni. Lähde: World Bank (2023).

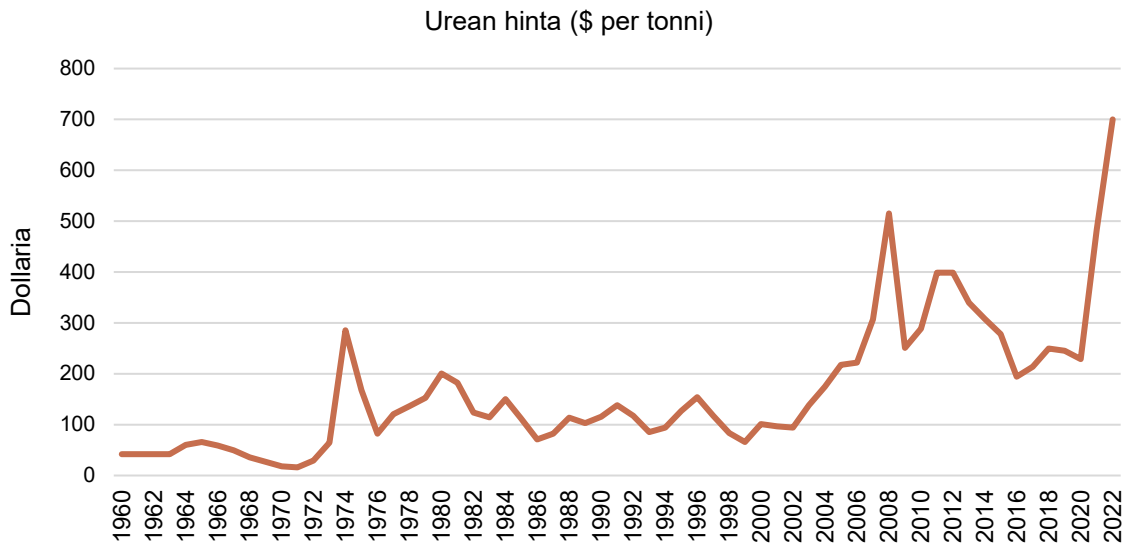
3.2 Typen alkuperä

Suurin osa kasveista ei pysty hyödyntämään ilmassa olevaa typpeä, jolloin ne tarvitsevat maaperästä liukoista typpeä. Tästä syntyy tarve typpilannoitukselle. Typpi on lannoitevalmisteissa usein ammonium- ja/tai nitraattimuodossa, jolloin kasvit voivat hyödyntää ravinnettä tehokkaammin. Typen käyttömuoto ja valmistustavat ovat vaihdelleet aikojen saatossa, mutta nykyisellään typen teollisen valmistamisen arvoketju aiheuttaa CO₂-päästöjä globaalisti merkittäviä määriä.

Valtaosa maailman ammoniakista valmistetaan Haber-Bosch -menetelmällä, jossa maakaasusta ensin irrotetaan höyryreformoinnilla vetyä. Seokseen lisätään ilmaa, jolloin prosessissa muodostuu vety-typpeos, jota edelleen työstetään hapettamalla häikäsihiilidioksidiksi ja poistamalla tarpeettomia aineita. Lopuksi ammoniakkia muodostuu veden ja typen reagoitessa keskenään erittäin kuumassa ja paineistetussa tilassa. (Humphreys ym. 2021).

Arviot lannoitekäyttöön valmistetun teollisen typen aiheuttamista päästöistä vaihtelevat laskentatavasta riippuen noin 400 miljoonasta tonnista jopa 1.13 gigatonniin CO₂e (Menegat ym. 2022, Humphreys ym. 2021) Bellarby ym. 2008). Näiden arvioiden perusteella teollisen typen valmistus vastaisi noin 1–2,4 % globaaleista päästöistä.

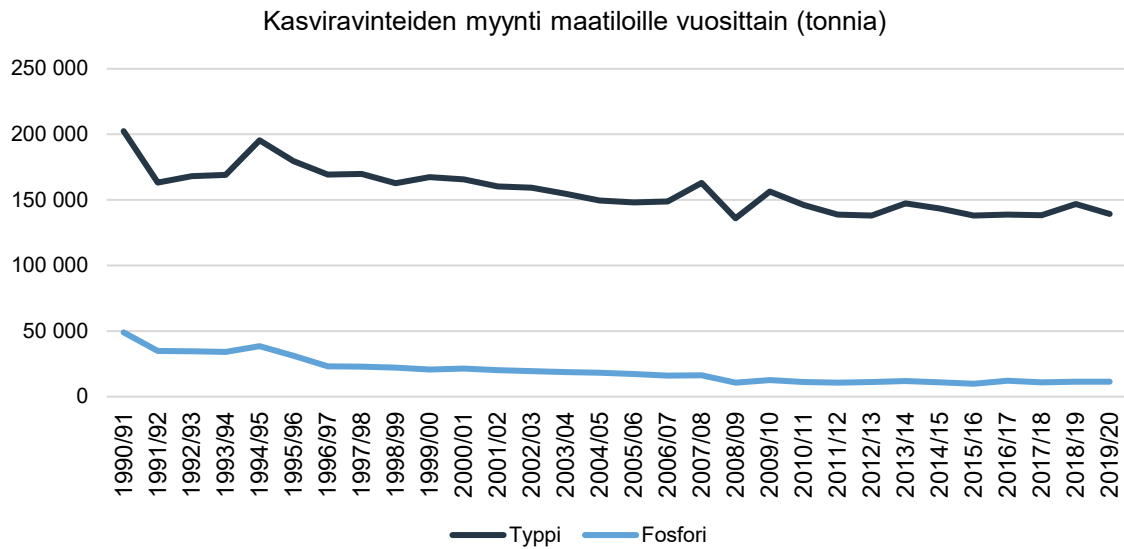
Raaka-aineena typen valmistamisessa ei ole samanlaisia niukkuusrajoitteita kuin fosforin osalta, mutta energian saatavuuden haasteet ovat vaikuttaneet myös typen valmistukseen. Tästä johtuva kustannusten kehitys on herättänyt huolta. Ukrainan ja Venäjän rooli lannoitevalmisteiden tuojina yhdistettynä maakaasun globaaliin saatavuuteen aiheuttavat myös yleistä epävarmuutta kansainvälisille markkinoille. Ureanhinnassa (Kuvaaja 3) on nähtävissä raju hinnan nousu keväällä 2022 vastaavasti kuin fosfaattikiven hinnassa (Kuvaaja 2).



Kuvaaja 3. Urean hinta dollaria per tonni. Lähde: World Bank (2023).

3.3 Fosforin ja typen tarve lannoitetuotannossa ja markkinatilanteen kehitys

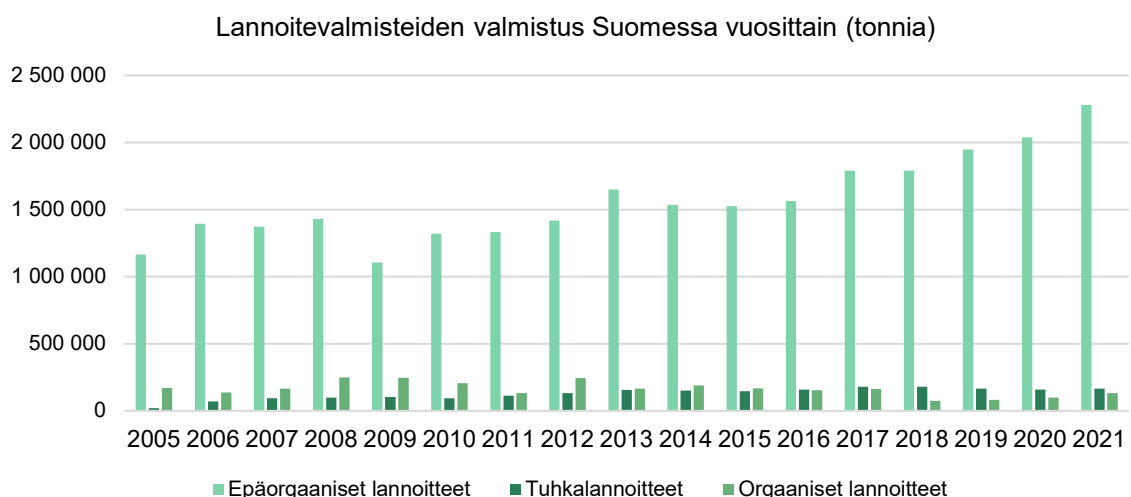
Luonnonvarakeskus kerää tietoja kasviravinteiden (fosfori, typpi, kalium) myynnistä maataloille (LUKE 2022b). Myynti on pysynyt tasaisena viimeisen kymmenen vuoden ajan. Vuonna 2019/2020 fosforiravinteita myytiin noin 11 463 tonnia ja typpeä vastaavasti 139 316 tonnia. Nämä kasviravinteiden myynnin mittaluokat ovat linjassa Marttinen ym. (2017) tutkimuksen löydösten kanssa ravinteiden kokonaiskäytöstä Suomessa, vaikkakaan ravinteiden myynti ei yksinomaan kerro niiden kokonaiskäyttömääriä. Lannoitteiden säilyvyydeksi ilmoitetaan yleensä vähintään vuosi, joten lannoitteiden käytössä voi olla viivettä. Lannoitteiden myynti on kuitenkin pysynyt jo pitkään samassa mittaluokassa, ja heittelyä erityisesti fosforin osalta on vähemmän.



Kuvaaja 4. Kasviravinteiden myynti maataloille. Lähde: (LUKE 2022b).

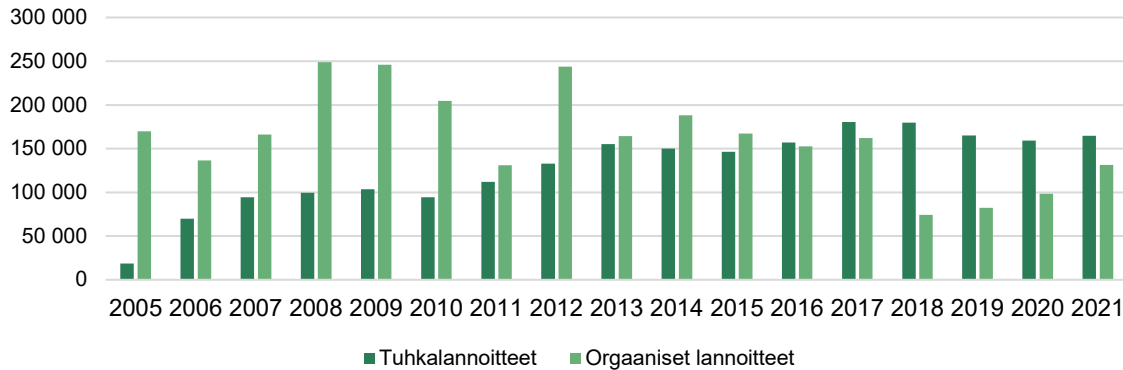
Ruokavirasto ylläpitää lisäksi tilastoa erilaisten lannoitevalmisteiden valmistuksesta. Lannoitevalmisteiden valmistus jaetaan Ruokaviraston luokituksessa kolmeen kategoriaan: epäorgaaniset lannoitteet, tuhkalannoitteet ja orgaaniset lannoitteet. Lannoite, joka sisältää apatiitista louhittua fosforia, luetaan epäorgaaniseksi lannoitteeksi. Vastaavasti esimerkiksi lannoite, joka sisältää jostakin lähteestä kierrätettyä fosforia, luetaan orgaaniseksi lannoitteeksi. Tuhkalannoitteet ovat runsaasti tuhkaa sisältäviä lannoitteita ja niitä käytetään pääsääntöisesti metsälannoitukseen.

Vuonna 2021 epäorgaanisia lannoitevalmisteita valmistettiin Suomessa noin 2,2 miljoonaa tonnia, tuhkalannoitteita noin 165 000 tonnia ja orgaanisia lannoitteita noin 131 000 tonnia. Epäorgaanisten lannoitteiden valmistus on kasvanut suhteellisen tasaisesti vuodesta 2015, ja lähes kaksinkertaistunut vuodesta 2005. Orgaanisten lannoitteiden valmistus on pysynyt vähäisenä, ja laskenut erityisesti viimeisen viiden vuoden aikana.



Kuvaaja 5. Lannoitevalmisteiden valmistus Suomessa 2005–2021. Lähde: Ruokavirasto (2022c).

Tuhkalannoitteiden ja orgaanisten lannoitteiden valmistus Suomessa vuosittain (tonnia)



Kuvaaja 6. Tuhkalannoitteiden ja orgaanisten lannoitteiden valmistus Suomessa 2005–2021. Lähde: Ruokavirasto (2022c).

Lannoitevalmisteet sisältävät fosforia ja typpeä eri pitoisuuksina. Riippuen lannoitettavan alueen tarpeista, valitaan sopivin lannoite optimaalisen kasvun varmistamiseksi. Erityisesti NPK-lannoitevalmisteiden valmistuksessa tarvitaan typpeä, fosforia sekä kaliumia. Lannoitetuotannossa on tähän asti kiinnitetty huomiota erityisesti puhtaisiin raaka-aineisiin ja turvallisiin tuotteisiin, minkä vuoksi puhdas louhittu fosfori ja teollisesti tuotettu typpi ovat olleet pääraaka-aineita kasviravinnelannoitteissa. Myös lannoitettujen peltojen kasvien ostajat ovat arvostaneet puhtaita ravinteita, ja kierrätysravinteita ei ole vielä omaksuttu käyttöön laajalti, vaikka lainsäädännöllisesti estettä ei olisi. (Lehtoranta ym. 2021).

NPK-lannoitteet sisältävät yleensä fosforia noin 0–7 prosenttia ja typpeä 15–27 prosenttia. Oikeanlainen ravinnepitoisuus valitaan tarpeen mukaan ravinnetaseen ja lannoitus suunnitelman mukaisesti.

4. Kierrätysravinteiden soveltuvuus lannoitetuotantoon

Lannoitteiden tehtävä on lisätä ravinteiden määrää lannoitettavassa maassa, jotta kasvien kasvu olisi optimaalista. Oleellista on, että ravinteet imeytyvät kasveihin tehokkaasti ja että lannoitteita on turvallista käyttää. Marttinen ym. (2017) tunnistivat kaksi suurta haastetta kierrätysravinteiden soveltuvuudessa lannoitekäyttöön: käyttökelpoisuuden ja haitta-ainejäätymät. Käyttökelpoisuudella viitataan jätevedenpuhdistusprosessissa talteen otetun fosforin ja typen soveltuvuuteen kasveille. Haitta-ainejäätymillä tarkoitetaan raskasmetalleja, mikromuoveja, lääkeainejäätymiä tai muita orgaanisia haitta-aineita. Jätevesilietteen haitta-aineita on tutkinut ainakin Vieno ym. (2018) ja Fjäder (2016).

Kansallinen valvonta ja ohjeistus

Suomessa lannoitetuotantoa valvoo Ruokavirasto, joka tyyppihyväksyy erilaiset lannoitevalmisteet, myös orgaaniset lannoitteet. Jätevesilietteiden osalta Suomessa noudatetaan tätä raporttia kirjoittaessa siirtymäaikaa, jossa vanhan lainsäädännön mukaisia tyyppinimiluettelon ja EU-lannoiteasetuksen mukaisia tuotteita voi valmistaa vuoden 2023 loppuun asti. Ainoastaan käsiteltyä jätevesilietettä saa levittää pellolle, ja orgaanisten lannoitevalmisteiden markkinoille saattaminen edellyttää laitoshyväksynnän saamista. Lietettä voi käsitellä esimerkiksi kompostoimalla, mädättämällä tai kalkkistabiloimalla. (Ruokavirasto 2022a).

Jätevesistä tuotettuja orgaanisia lannoitteita koskevat yleiset lannoitteiden laatuvaatimukset sekä lisärajoitukset koskien viljelymaan haitallisten metallien enimmäispitoisuuksia, lietteen aiheuttaman kuormituksen rajoituksia sekä puhdistamolietepohjaisten tuotteiden käytön varoaika.

Yhdyskuntajätevesistä talteen otettujen kierrätysravinteiden käyttökelpoisuus kasveille

Kierrätysravinteiden käyttökelpoisuudesta kasveille on koottu ProAgria Keskusten Liiton toimesta opas puhdistamolietteen soveltuvuudesta kasvien lannoittamiseen vuonna 2016, ja opasta on päivitetty viimeksi vuonna 2020.

Lieteperäisen fosforin liukoisuus ja käyttökelpoisuus riippuu erityisesti käytetystä saostusmenetelmästä ja rauta- sekä alumiinisuolojen käytöstä. Nykyisillä jätevesilietteen käsittelymenetelmillä liukoisen fosforin osuus kierrätyslannoitevalmisteen kokonaisfosforista on enimmillään vain muutamia prosentteja. (ProAgria 2016). Tästä syystä riittävän nopean lannoitevaikutuksen takaamiseksi käytetään yleensä myös epäorgaanista fosforia, joka on liukoisemmassa muodossa.

Typen osalta liukoisuuteen vaikuttaa suuresti orgaanisen aineksen käsittelytapa sekä materiaalin hajoamisaste. ProAgrian opas käsittelee Suomessa käytetyimpiä jätevesilietteen käsittelymenetelmiä: *"Mädätys muuttaa typpeä ammonium-muotoon, jolloin se voi olla altis haihtumaan varastoinnin tai levityksen yhteydessä."* Vastaavasti *"Kompostointi hajottaa orgaanista ainesta hapellisessa prosessissa, joten helppoliukoisen typen osuus vähenee ja mahdollinen välitön typpilannoitusvaikutus vähenee kompostoinnin vaikutuksesta."*

Puhdistamolietepohjaisen liukoisen typen lannoitevaikutuksen todetaan olevan samankaltainen kuin epäorgaanisten lannoitteiden liukoisen typen. Kuitenkin orgaanisen typen hidas vapautuminen puhdistamolietepohjaisissa valmisteissa nähdään ongelmaksi optimaalisen ravinteiden saatavuuden takaamiseksi, minkä takia epäorgaanisen typen käyttöä orgaanisen typen rinnalla suositellaan. (ProAgria 2016).

Yhdyskuntajätevesistä talteen otettujen kierrätysravinteiden haitta-ainejäämät

Nykyisessä jätevedenkäsittelyprosessissa joitakin haitta-aineita jää käsiteltyyn lietteeseen, vaikka kokonaisuutena haitallisten aineiden pitoisuudet ovat yleensä alhaisia ja alle lainsäädännöllisten rajojen. Eri haitta-aineita ja niiden poistumista jätevesiprosessissa on vedetty yhteen kattavasti SYKEN Jätevesien ravinteet kiertoon turvallisesti ja tehokkaasti -raportissa (Lehtoranta ym. 2021).

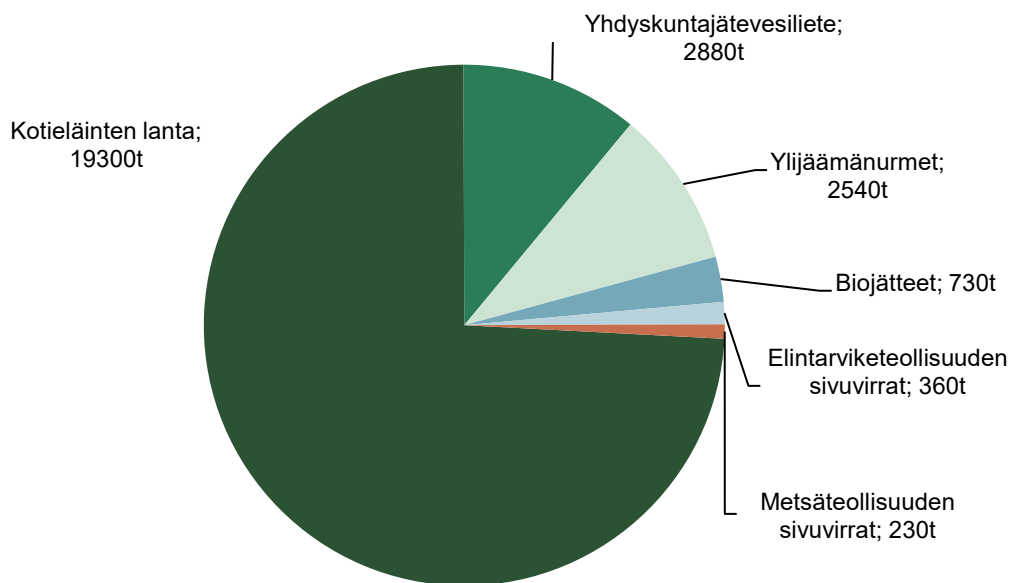
Myös ProAgria on käsitellyt oppaassaan puhdistamolietepohjaisten lannoitteiden käytöstä myös haitta-aineiden käyttäytymistä maaperässä ja kertymistä elintarvikkeisiin.

Yhteenvetona yhdyskuntajätevesilietteen haitta-aineiden tutkimuksesta voidaan todeta, että jätevedet sisältävät runsaasti erilaisia orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä, raskasmetalleja, lääkeaineita, mikromuoveja ja taudinaiheuttajia, joita ei kyetä vielä täydellisesti eristämään osana ravinteiden talteenottoa. Näitä yhdisteitä tunnistetaan jatkuvasti enemmän, ja niiden poistumista vedenpuhdistusprosessissa seurataan yhä tarkemmin. Tutkimus on kuitenkin vielä kesken, eikä yleisesti hyväksytyjä maksimi- tai raja-arvoja ole saatavilla kansallisella tai kansainvälisellä tasolla.

Orgaanisten kierrätysravinteiden lähteet

Erlaisiksi orgaanisten kierrätysravinteiden lähteiksi on tunnistettu ainakin kotieläinten lanta, yhdyskuntajätevesiliete, ylijäämänurmet, biojätteet, elintarviketeollisuuden sivuvirrat ja metsäteollisuuden sivuvirrat, jotka sisältävät yhteensä noin 26 000 tonnia fosforia (Marttinen ym. 2017). Orgaanisista lähteistä lanta sisältää eniten fosforia (19 300 t), ja yhdyskuntajätevesiliete on toiseksi suurin orgaanisen fosforin lähde (2 880 t). Fosforin määrä on tässä arvioissa esitetty kuivattuna ja käsiteltynä lietteenä, joka sisältää noin 2/3 puhdistamoille tulevasta fosforikuormasta, joka nykyteknologioilla on suurempi. Tässä selvityksessä rajausta on yhdyskuntien jätevesilietteiden ravinteiden talteenoton menetelmissä, ja fosforin määrää puhdistamolle tulevissa jätevesissä tarkastellaan seuraavassa kappaleessa.

Orgaaniset kierrätysfosforin lähteet vuonna 2016 (tonnia)



Kuvaaja 7. Orgaaniset kierrätysravinteiden lähteet vuonna 2016. Lähde: Marttinen et al. (2017)

Fosforin ja typen määrä saapuvissa jätevesissä

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu kerää jätevesien kuormitustiedot Suomen yhdyskuntajätevedenpuhdistamoiden velvoitetarkkailutiedoista (SYKE 2022c). Fosforikuorma oli vuonna 2019 noin 3 830 tonnia ennen käsittelyä. Vastaavasti typpekuorma ennen käsittelyä oli vuonna 2019 noin 28 090 tonnia. Viime vuosina puhdistamoille tuleva typpekuormitus on ollut lievässä nousussa. Fosforikuormitus on vastaavassa ajassa laskenut lievästi.



Kuvaaja 8. Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoille tuleva kuormitus. Lähde: SYKE 2022b.

5. Jätevesilietteiden sisältämien ravinteiden hyödyntämisen nykytilanne

Jätevesilietteiden ravinteita voidaan hyödyntää eri tavoin, eikä ravinteiden talteenotto ole ainoa menetelmä, jossa ravinteet pääsevät takaisin kiertoon. Nykyisellään ravinteita hyödynnetään pääasiallisesti osana lietetuotteita, ja varsinaista ravinteiden talteenottoa tehdään selkeästi vähemmän. Ravinteita on mahdollista ottaa talteen erottamalla ne lietteestä ja hyödyntää erikseen esimerkiksi lannoitetuotannossa. Nykyiset jätevedenkäsittelymenetelmät mahdollistavat ravinteiden säilymisen lietteissä, jolloin liete voidaan hyödyntää sellaisenaan. Lietteestä tapahtuva ravinteiden erottelu vähentää haitta-aineiden määrää lopputuotteessa, mutta usein myös käytettävissä olevien ravinteiden määrää.

Erilaiset ravinteiden talteenottomenetelmät yleistyvät maailmanlaajuisesti, mutta läpimurtoa ravinteiden talteenoton suhteen ei ole vielä tapahtunut. Ravinteita kuitenkin otetaan talteen entistä enemmän ja eri menetelmien pilottilaitokset ovat yhä yleisimpiä maailmalla. Mikään teknologia ei ole saavuttanut dominoivaa markkina-asemaa, ja uusia sekä olemassa olevia menetelmiä kehitetään jatkuvasti.

5.1 Puhdistamolietteen käsittelymenetelmien osuudet Suomessa

Yhdyskuntajätevesien ravinteiden kierrätyksen kokonaisvaltainen läpimurto voi vaatia jätevesien käsittelyn ja yksikköprosessien kokonaisvaltaisempaa uudistamista. Tämän selvityksen tavoitteena on kuitenkin ymmärtää mitkä teknologiat voisivat olla hyödynnettävissä jo nykyisessä järjestelmässä. Nykytilanteessa ravinteiden talteenoton menetelmät ovat usein linkittyneitä puhdistamolietteen käsittelyyn.

Seuraavissa kuvaajissa on esitetty lietteenkäsittelyn tilanne Suomessa vuoden 2021 YLVA-tietojärjestelmään raportoituihin tietoihin perustuen. Jätevesilietteiden tietoja vuodelta 2021 oli raportoitu YLVA-tietojärjestelmään yhteensä 317 jätevedenpuhdistamolta. Suomessa oli vuonna 2019 toiminnassa noin 350 jätevedenpuhdistamoa, joissa käsiteltiin asukasvastineluvultaan vähintään 100 henkilön jätevedet (SYKE, 2022b). Näin ollen voidaan katsoa, että YLVA-järjestelmän tiedot kattavat ainakin 90 % Suomen jätevesilietteiden määristä.

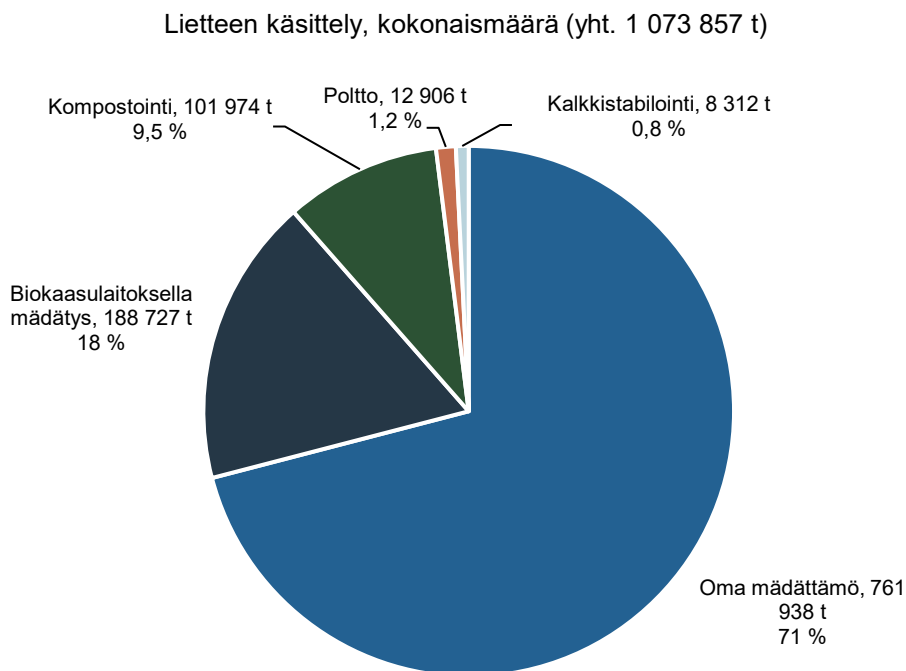
Tietojen raportoinnista on huomioitava, että raportoitava taho eli jätevedenkäsittelyn järjestävä toimija vastaa tietojen oikeellisuudesta. Järjestelmään raportoidaan jätevirran kokonaispaino tonneina vuodessa sekä sen kuiva-ainepitoisuus prosentteina. Tietoja tarkastellessa ja verrattaessa esimerkiksi puhdistamoiden vuosiraportteihin havaittiin, että osalta puhdistamoista oli YLVA-järjestelmään kirjattu puhdistamolietteen tilavuus painon sijaan. Usein myös kuiva-ainepitoisuus on ilmoitettu virheellisesti, esimerkiksi 100 %. Kuvaajien 9 ja 10 arvojen voidaan nämä seikat huomioiden sanoa olevan paras mahdollinen kuvaus jätevesilietteiden käsittelystä raportoitujen tietojen perusteella. Suuruusluokaltaan lietteiden määrät vastaavat aikaisemmissa julkaisuissa kuten VVY:n monistesarjassa 71 ilmoitettuja määriä ja olivat lähimpänä vuoden 2012 lietemääriä, jotka Tilastokeskus on ilmoittanut.

Käytetyt tiedot perustuvat YLVA-tietojärjestelmään raportoituihin lähteviin sekä tuleviin jätevirtoihin. Tietoja on pyritty yhdenmukaistamaan vastaamaan kuivatun jätevesilietteen määrää ennen jatkokäsittelyä, esimerkiksi mädätystä tai kompostointia, ja lietemäärästä on laskettu myös kuivapaino. Puhdistamoilta, joilla on oma mädättämö, on ilmoitettu pois kuljetetun mädätetyn lietteen määrä. Ennen mädätystä olevan lietteen määrän arvioinnissa on oletettu, että noin kolmannes lietteen määrästä hajoaa mädätyksessä. Mikäli lietteen kuiva-ainepitoisuus on raportoitu selkeästi virheellisesti, on kuivapainoa laskettaessa käytetty muiden puhdistamojen ilmoittamien vastaavien lietejakeiden kuiva-ainepitoisuuksien keskiarvoa.

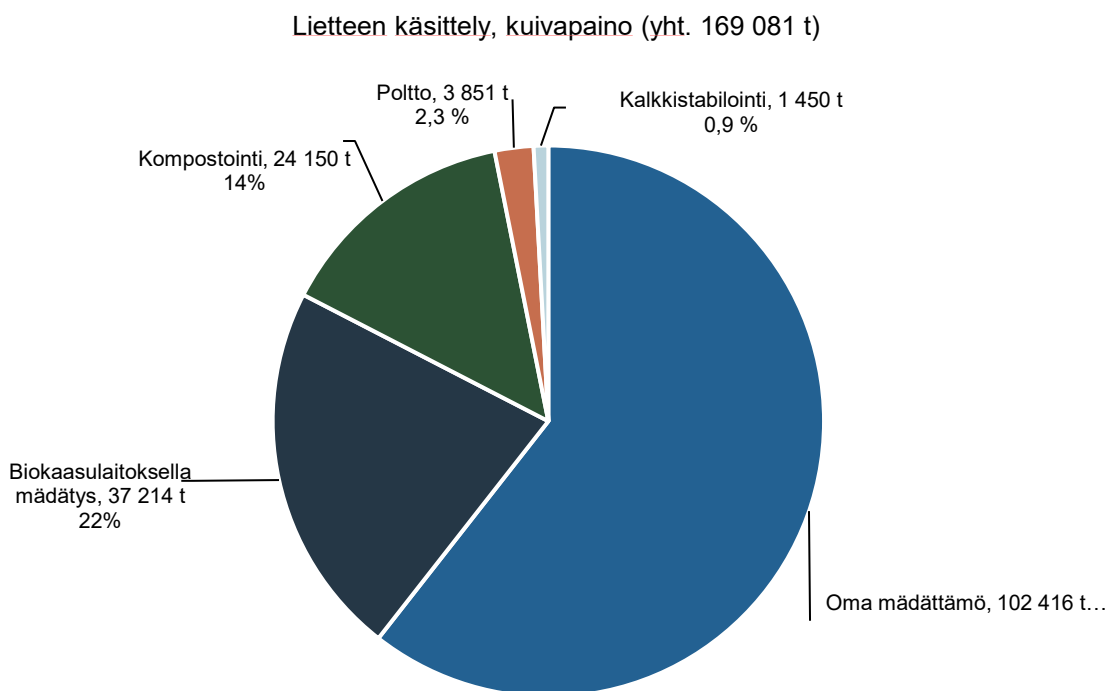
Jätevesilietteen käsittely on tarkastelussa jaoteltu kalkkistabilointiin, kompostointiin, polttoon ja mädätykseen biokaasulaitoksella tai mädätykseen omalla mädättämöllä. Oma mädättämö -osiossa on huomioitu myös mädättämöt tai biokaasulaitokset, jotka ovat puhdistamon välittömässä yhteydessä. Kalkkistabiloitu liete kuljetetaan yleisesti muualle kompostoitavaksi tai muuhun jatkokäsittelyyn. Myös mädätetty liete jatkokäsitellään tyypillisesti kompostoimalla. VVY:n vuonna 2021 julkaisemassa monistesarjassa 71 osa puhdistamolietteilistä ilmoitettiin käsiteltävän myös termisesti tai kemiallisesti. Tiettävästi kyseiset laitokset eivät ole olleet enää toiminnassa vuonna 2021.

Verrattaessa käsittelymenetelmiä lietteen kokonaismäärän ja kuivapainon mukaan niiden osuudet eroavat hieman toisistaan. Lietteen kuivapainona tarkasteltuna puhdistamolietteilistä suurin osa mädätetään (yli 80 %), vajaa kuudennes kompostoidaan, reilu kaksi prosenttia poltetaan ja alle prosentti kalkkistabiloidaan.

Typen hyödyntämisen näkökulmasta mädätys on yleisesti suositeltavaa; esimerkiksi SYKE Policy brief (2022) suosittelee mädätyksen lisäämistä, sillä *”sen avulla tyypeä voidaan muuntaa kasveille käyttökelpoisempaan muotoon ja ottaa talteen lietteen sisältämää energiaa biokaasuna”*.



Kuvaaja 9. Kuivatun jätevesilietteen käsittely Suomessa YLVA-raportoinnin mukaan vuonna 2021. Lietteen määrä märkätonneina vuodessa.



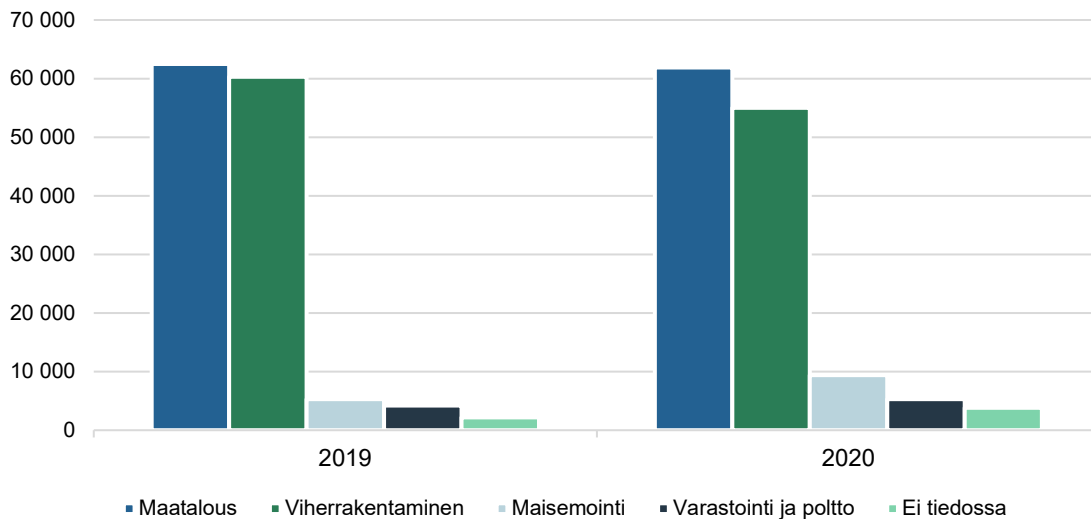
Kuvaaja 10. Kuivatun jätevesilietteen käsittely Suomessa YLVA-raportoinnin mukaan vuonna 2021. Lietteen kuivapaino tonneina vuodessa.

5.2 Puhdistamolietteen ja sen sisältämien ravinteiden hyötykäytön nykytilanne Suomessa

Vaikka ravinteita ei vielä systemaattisesti erotella käsitellystä jätevesilietteestä, puhdistamolietteessä olevat ravinteet hyödynnetään kuitenkin käsittelyprosessin jälkeen. Käsitelty puhdistamoliete toimitettiin käsittelylaitoksilta suurelta osin maatalouteen ja viherrakentamiseen. (Vilpanen, M., Seppälä P. 2021).

Kokonaisuudessa lietettä toimitettiin hyötykäyttöön 134 000 tonnia (kuiva-t) vuonna 2019 ja 135 000 tonnia (kuiva-t) vuonna 2020. VVY:n puhdistamolietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilakatsauksen mukaan käsiteltyä lietettä hyödynnetään eniten sellaisenaan maataloudessa, jonne toimitettiin noin 61 900 kuivatonna lietettä vuonna 2020. Seuraavaksi eniten lietettä hyödynnettiin viherrakentamisessa (55 000 kuivatonna), joka on tosin vähentynyt noin 5 000 tonnilla vuodesta 2019 vuoteen 2020. VVY:n nykytilakatsauksessa korostetaan maatalouden suurta osuutta, joka poikkeaa virallisista tilastoista. Lietteen toimittaminen maatalouden käyttöön on yleisempää kuin aiemmin on luultu.

Eri hyötykäyttökohteisiin toimitetut lietemäärät vuosina 2019 ja 2020 (tonnia)



Kuvaaja 11. Eri käyttökohteisiin toimitetut lietemäärät vuosina 2019 ja 2020. Lähde: Vilpanen, M., Seppälä P. 2021, VVY.

Lietteen hyötykäytön kohde vaihtelee alueittain. Kun tarkastellaan lietteen hyötykäyttöä maatalouden osalta alueellisesti, painomäärässä eniten lietettä hyödynnettiin maatalouteen Hämeessä, yli 15 000 tonnia (kuiva-t). Toiseksi eniten maatalouteen toimitettiin lietettä Etelä-Pohjanmaalla ja kolmanneksi eniten Pohjois-Pohjanmaalla, molemmissa noin 10 000 tonnia (kuiva-t). Uudellamaalla, jossa lietettä hyöty käytettiin eniten, yli 80 % toimitettiin viherrakentamiseen. Maatalouden osalta Uudellamaalla hyödynnettiin vastaavasti alle 20 %.

Huomionarvoista on, että Kaakkois-Suomessa, Pohjanmaalla, Keski-Suomessa, Kainuussa ja Lapissa ei käsiteltyä lietettä toimitettu juuri lainkaan maatalouskäyttöön.

Uusi voimaan tullut fosforiasetus (1/2023) voi vaikuttaa jätevesilietteen hyödyntämiseen maataloudessa ja viherrakentamisessa. Uutta fosforiasetusta tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 6 Jätevesilietteen hyötykäyttöön liittyvät lainsäädännön uudistukset.

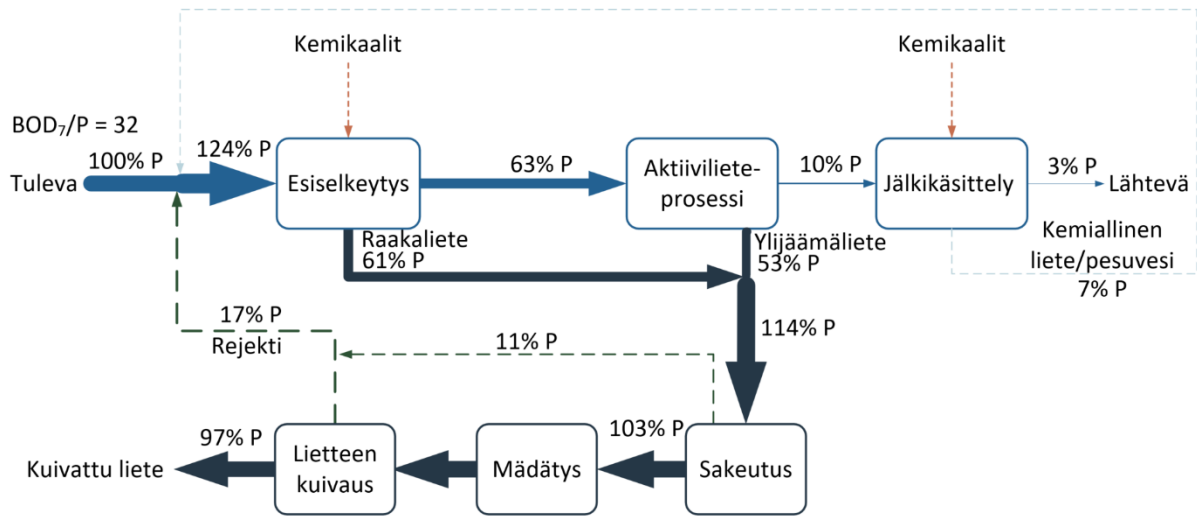
5.3 Jätevedenpuhdistamoiden ravinnevirrat

Yhdyskuntien jätevedenpuhdistuksessa on useita prosesseja, ja ravinteiden määrät prosessin eri vaiheissa vaihtelevat. Myös suhteelliset ravinnepitoisuudet vaihtelevat riippuen käytetyistä puhdistusmenetelmistä. Seuraavien ravinteiden massataseiden määrittämiseen on käytetty prosessimallinnusohjelmaa SUMO (Dynamita) ja mallinnuksen lähtötietona keskimääräistä YLVA-aineiston mukaista tulevan jäteveden laatua. SUMO-ohjelmistolla on mallinnettu muutamia erilaisia jätevedenpuhdistamotyyppisiä fosforin ja typen poistoon ja arvioitu näiden ravinteiden prosentuaaliset osuudet eri jakeissa. Mallinnuksen osalta on huomioitava, että todelliset prosenttimäärät vaihtelevat tulevan jäteveden ja jätevedenpuhdistamon prosessien mukaan.

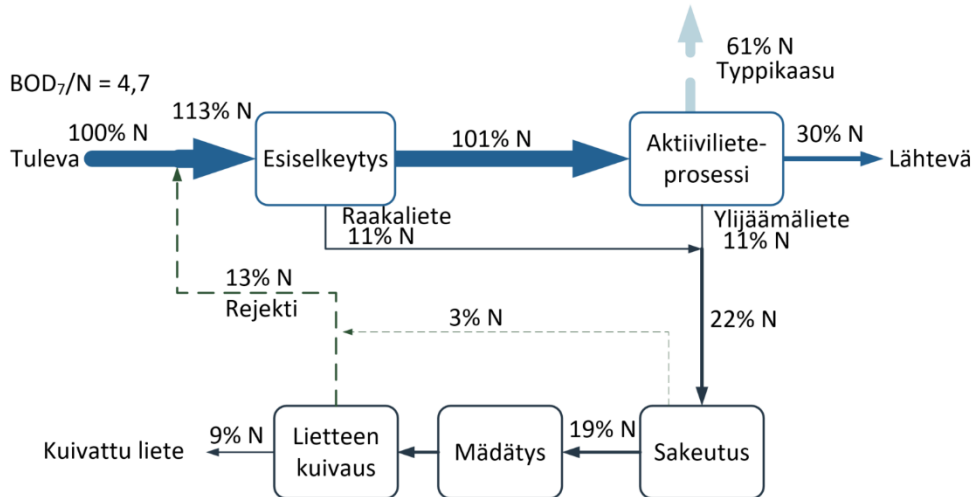
Seuraava tarkastelu on tehty keskimääräiselle yhdyskuntien jätevesiä käsittelevälle puhdistamolle. Ravinteiden massataseiden mallinnuksen lähtökohtana SUMO-ohjelmistolla on mallinnettu 100 000 AVL:n jätevedenpuhdistamo ja käytetty seuraavia arvoja ravinnekuormien määrittämisessä: BOD₇-kuorma 70 g BOD₇/as/d, kokonaistypen kuorma 15 g N/as/d ja kokonaisfosforin kuorma 2,2 g P/as/d. Jäteveden lämpötilaksi on asetettu 10 °C. Puhdistustehokkuudet on asetettu vastaamaan Suomen ympäristökeskuksen raportoimia vuoden 2019 arvoja, jotka ovat BOD:n osalta 98 % ja fosforin osalta 97 % (SYKE, 2022b). Typen osalta SYKE:n raportoima puhdistustehokkuus on 63 % ja mallissa on käytetty kaksi prosenttia alhaisempaa lukua, joka perustuu mallin arvioon typenpoistosta aktiivilieteprosessissa.

Tyypillinen suomalainen jätevedenpuhdistusprosessi koostuu mekaanisesta esikäsittelystä, esiselkeytyksestä, biologisesta prosessista, joka on tyypillisesti aktiivilieteprosessi, sekä jälkikäsittelystä. Esiselkeytyksen raakaliete ja biologisen prosessin ylijäämäliete johdetaan lietteen käsittelyyn. Lietteen käsittelyssä lopullinen aines jakaantuu kuivajakeeseen, nestejakeeseen (rejektivesi) ja prosessin häviöihin, kuten päästöihin ilmaan. Lietteen mädätys tehdään tyypillisesti mesofiliisissa olosuhteissa. Mikäli lietettä esikäsitellään ennen mädätystä tai mädätys tapahtuu termofiilissä olosuhteissa, enemmän orgaanista ainesta hajoaa ja samalla lietteestä vapautuu enemmän typpeä .

Kuvassa 1 on esitetty fosforin massatase tyypilliselle jätevedenpuhdistamolle ja kuvassa 2 vastaavasti typen massatase. Nykyisellään, sisäiset kierrot huomioiden, 97 % puhdistamolle tulevasta fosforista päättyy kuivattuun lietteeseen ja loput lähtevään veteen. 17 % fosforista kulkeutuu uudelleen prosessin läpi sisäisten kiertojen mukana. Puolestaan tpestä 9 % on sitoutuneena kuivattuun lietteeseen, 61 % haihtuu ilmaan ja 30 % lähtevään veteen. 13 % tpestä kiertää rejektiveden mukana prosessin alkuun. Typen massatase pysyy vastaavana, vaikka prosessia muutettaisiin biologiseksi fosforinpoistoksi. Seuraavissa kuvissa on esitetty fosforin massataseet erityyppisille jätevedenpuhdistamoille.

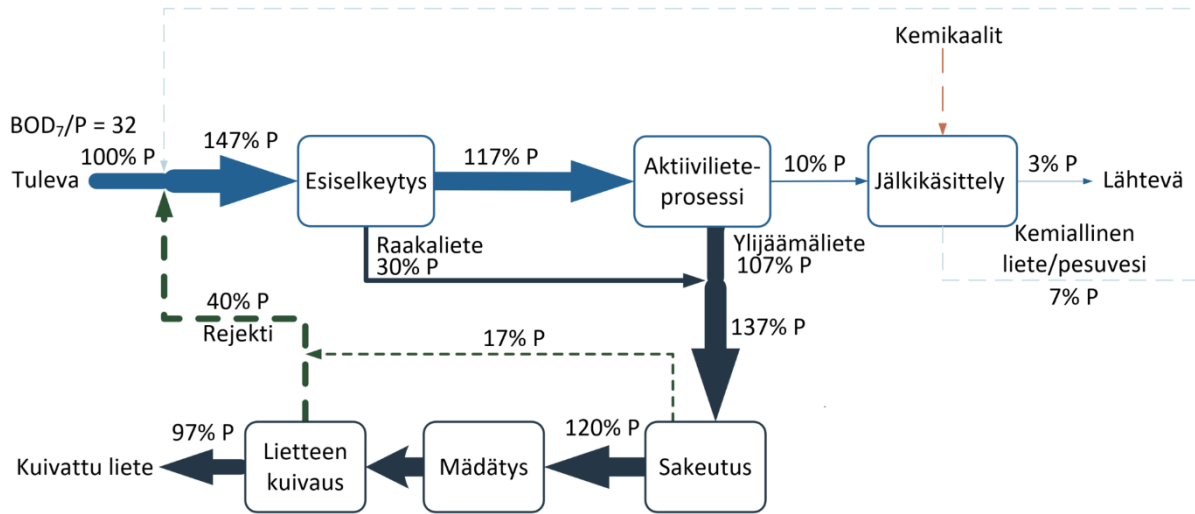


Kuva 1. Fosforin massatase tyypillisellä jätevedenpuhdistamolla, jossa on kemiallinen fosforinpoisto, jälkikäsittely ja lietteen mädätys (mesofiilinen).



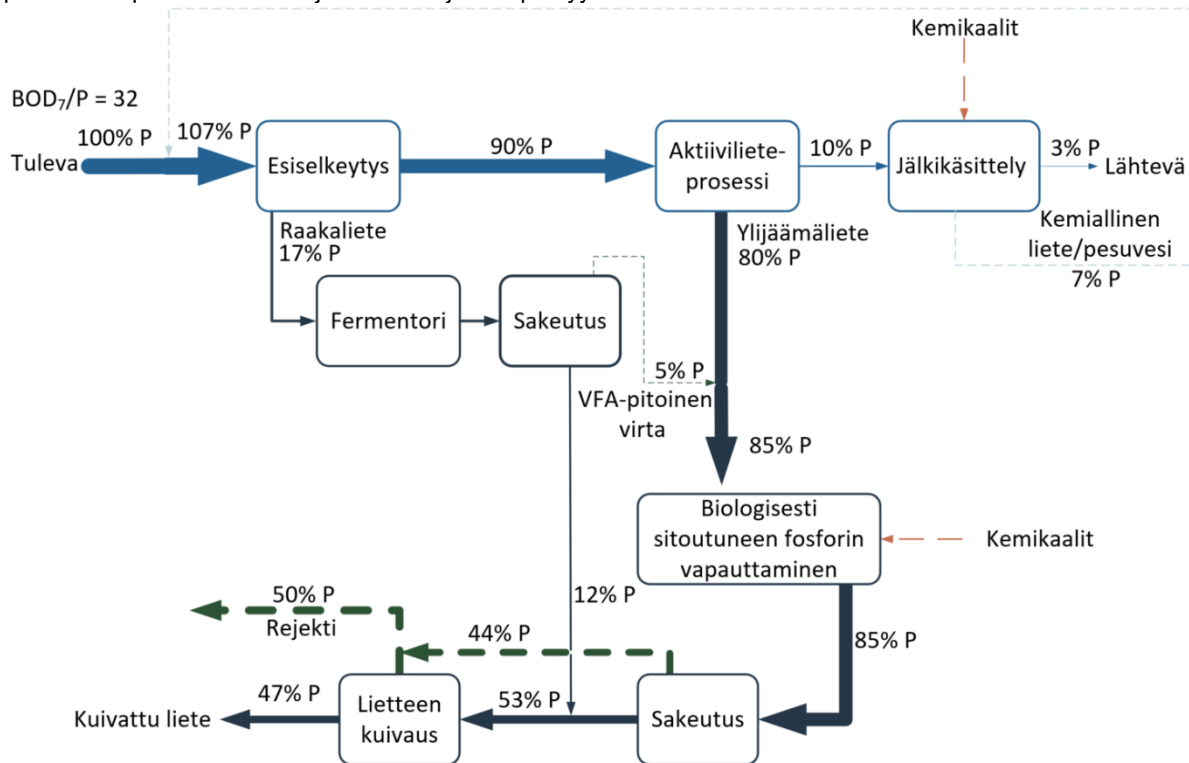
Kuva 2. Typen massatase tyypillisellä jätevedenpuhdistamolla, jossa on kemiallinen fosforinpoisto, jälkikäsittely ja lietteen mädätys (mesofiilinen).

Kuvassa 3 on esitetty fosforin massatase jätevedenpuhdistamolla, jolla on biologinen fosforinpoisto sekä kemiallinen fosforin jälkisaostus ja muodostunut liete mädätetään. Fosforin osuus kuivatussa lietteessä pysyy samana kuin pelkällä kemiallisen fosforinpoiston puhdistamolla. Fosforin osuus rejektivedessä nousee 40 %:iin, sillä biologisessa fosforinpoistossa lietteeseen sitoutunut fosfori vapautuu mädätyksessä.



Kuva 3. Fosforin massatase jätevedenpuhdistamolla, jossa on biologinen ja kemiallinen fosforin poisto sekä lietteen mädätys.

Kuvassa 4 fosforin massatase on kuvattu jätevedenpuhdistamolle, jolla on käytössä biologinen fosforinpoisto ja kemiallinen jälkisaostus, mutta liettä ei mädätetä. Jotta lietteeseen sitoutunut fosfori saadaan vapautettua, tarvitaan riittävän pitkä viipymä hapettomissa olosuhteissa. Fosforin biologinen sitoutuminen edellyttää riittävää hiilen saatavuutta ja sitä voidaan tehostaa kemikaalien annostelulla. Kuvatussa prosessissa 47 % tulevasta fosforista päätyy kuivattuun lietteeseen, 50 % fosforista kulkeutuu uudelleen prosessin läpi sisäisten kiertojen mukana ja 3 % päätyy lähtevään veteen.



Kuva 4. Fosforin massatase jätevedenpuhdistamolla, jossa on biologinen fosforinpoisto (BioP) ilman lietteen mädätystä.

5.4 Ravinteiden talteenoton potentiaali

Seuraavassa tarkasteltavat ravinteiden talteenottopotentiaalit perustuvat edellisessä kappaleessa mallinnettuihin massataseisiin, jotka on laadittu keskimääräisellä yhdyskuntajätevesien keskimääriseen laatuun perustuvalla kuormituksella. Taseissa ei oleteta normaalista poikkeavaa teollisuuskuormaa, joka muuttaisi niitä suuntaan tai toiseen. Esitetyissä arvoissa on huomioitu ainoastaan talteen saatava ravinne lopputuotteessa. Jäljelle jäävän lopun lietejäännöksenteen sisältää ravinnepotentiaalia ja sen hyödyntämistä esimerkiksi maataloudessa tai viherrakentamisessa ei huomioida tässä kohtaa. Muualla kirjallisuudessa on esitetty myös seuraavista arvoista poikkeavia arvioita ravinteiden talteenoton potentiaalille, mutta niitä ei huomioida tässä, sillä useasti niiden osalta ei ole kuvattu tarkemmin, mihin ne perustuvat, jotka oletettavasti perustuvat toisenlaisiin hiili-ravinne-suhteisiin tulevassa vedessä.

Fosfori

Nykyisissä jätevedenpuhdistusprosesseissa vesien sisältämästä fosforista saadaan poistettua noin 97 % alkuperäisestä. Poistetusta fosforista pääosa päätyy lietteeseen ja osa fosforista kiertää uudelleen prosessiin rejektiveden mukana.

Fosforin osalta talteenoton osuus parhaissa nykyisissä teknologioissa on jo korkealla. Lietteen poltolla ja fosforin talteenotolla lietetuhkasta voidaan saavuttaa lähes 90 % talteenottoaste puhdistamolle tulevasta fosforikuormasta. Muilla menetelmillä on mahdollista päästä jopa 60 % talteenottoasteeseen. Fosforin talteenoton osalta määrittävää on puhdistamon käsittelyprosessi. Eri menetelmien soveltuvuus puhdistamon käsittelyprosessiin voi rajoittaa saavutettavaa talteenottoastetta. Kappaleessa 8 on käsitelty tarkemmin eri menetelmiä ja niiden talteenottoasteita.

Tarkasteltaessa jätevedestä talteen otetun fosforin potentiaalia korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita on huomioitava sen liukoisuus ja käyttökelpoisuus kasveille. Vuonna 2023 voimaan astunut fosforiasetus vaikuttaa myös siihen kuinka suuri osa jätevedestä peräisin olevasta fosforista otetaan huomioon lannoituksessa.

Vuonna 2019 yhdyskuntien jätevesien fosforikuormitus Suomessa oli 3 830 tonnia (SYKE, 2022b). Teoreettisesti tästä voitaisiin ottaa talteen maksimissaan lähes 3 300 tonnia fosforia vuodessa, mikäli kaikki liete poltettaisiin ja fosfori otettaisiin talteen tuhkasta. Todennäköisesti tulevaisuudessa tullaan toteuttamaan talteenottoa erilaisilla tekniikoilla, joiden talteenottokapasiteetti vaihtelee ja on todennäköistä, että näin korkeaa talteenottoastetta ei kokonaisuudessa saavuteta. Todennäköisimmin fosforin talteenotto tulee keskittymään tulevina vuosina suuriin ja keskisuuriin laitoksiin, joten arvioitu määrä jää myös tästä johtuen alhaisemmaksi.

Typpi

Nykyisissä typenpoistoprosesseissa jätevedenpuhdistamoilla noin 50-70 % tyypestä haihtuu ilmaan, noin 20 % poistuu purkuveden mukana ja loppu jää lietteeseen. Tulevan jäteveden ravinnesuhteet vaikuttavat typen sitoutumiseen lietteeseen. Esimerkiksi jätevedenpuhdistamoilla, joille johdetaan elintarviketeollisuuden jätevesiä, sitoutumisaste on korkeampi. Myös mädätysprosessin olosuhteet ja mahdollinen mädätettävän lietteen esikäsitteily vaikuttavat typen vapautumiseen lietteestä. Lietteen käsittelyn ja mädätyksen rejektivesien mukana kiertää uudelleen prosessiin noin 13 % puhdistamolle saapuvasta typpikuormasta (Kuva 2). Typpirikkein virta jätevedenpuhdistamolla on nykyisellään rejektivesi, josta typen talteenotto voi olla järkevää esimerkiksi strippauksella tai kalvomenetelmillä.

Typen talteenoton osalta tulee huomioida, että nykYTEknologioilla on pääasiassa mahdollista ottaa talteen ainoastaan ammoniumtyppi nestejakeesta. Esimerkiksi strippauksella saada rejektiveden ammoniumtypestä talteen jopa 90 % tai yli, mikä tarkoittaa 9-10 % teoreettista talteenottoastetta tulevan jäteveden typpikuormasta.

Vuonna 2019 yhdyskuntien jätevesien typpikuormitus Suomessa oli 28 090 tonnia (SYKE, 2022b). Teoreettisesti tästä voitaisiin ottaa talteen maksimissaan noin 2 800 tonnia typpeä vuodessa, mikäli kaikki jätevesiliete mädätettäisiin ja sen rejektivesi käsiteltäisiin strippaamalla. Lietteen mädätyksen osuus on lisääntynyt ja tulee tulevaisuudessa varmasti lisääntymään, joten typen talteenotolle on hyvät siltä osin edellytykset. Pienillä puhdistamoilla mädätys ei ole kuitenkaan taloudellisesti kannattava investointi, jonka takia talteen saatavan typen määrä on todellisuudessa kuitenkin alhaisempi.

Muulla kirjallisuudessa on nostettu esille jätevesien erilliskeräys tai erottelu syntypaikalla lisäämään typen talteenottopotentiaalia. Tämä ei kuitenkaan ole realistinen skenaario koko Suomeen ottaen huomioon sen vaatimat investoinnit. Käytännössä nykyinen viemäriverkosto sekä talotekniset ratkaisut pitäisi uusita täysin. Jätevesien syntypaikkaerottelu on mahdollista lähinnä uusilla rakennettavilla asuinalueilla, joilla jätevesien määrä suhteessa koko Suomeen on pieni.

Jäteveden ravinteiden potentiaali korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita

LUKE (2023) mukaan vuonna 2020 väkilannoitteina fosforia käytettiin peltoviljelyyn 11 500 tonnia. Edellisen arvion mukaan fosforia voidaan saada talteen teoreettisesti maksimissaan vajaat 3 300 tonnia, jolla voitaisiin korvata 28 % käytettävistä epäorgaanisista lannoitteista.

LUKE (2022b).keräämien kasviravinteiden myyntitietojen mukaan epäorgaanisten lannoitteiden osalta typpeä käytettiin noin 139 000 tonnia. Edellisen arvioin mukaan typpeä voidaan saada talteen teoreettisesti maksimissaan noin 3 000 tonnia, jolla voitaisiin korvata 2 % käytettävistä epäorgaanisista lannoitteista.

Kuten aikaisemmin on mainittu, arviot perustuvat teoreettiseen maksimiin ja todellisuudessa talteen saatavien ravinteiden määrä on alhaisempi. Lietteen jatkokäsittelystä riippuen sen sisältämät ravinteet saadaan mahdollisesti hyödynnettyä esimerkiksi maataloudessa tai viherrakentamisessa, mikä lisää potentiaalia korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita. Tätä ei ole huomioitu taulukossa 1 esitetyissä arvioissa.

Taulukko 1. Yhdyskuntien jätevesien ravinteiden potentiaalinen talteenotto prosentti saapuvasta ravinnekuormasta ja potentiaali korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita

	Tulevan jäteveden kuorma, t/v	Max. Talteenottoaste	Talteen saatava määrä, t/v	Epäorg. Lannoite	Korvaus-potentiaali
Fosfori	3 830	86 %	3 275	11 500	28 %
Typpi	28 090	10 %	2 809	139 000	2 %

5.5 Kierrätysravinteiden talteenottolaitosten kansainvälinen tilanne

Kierrätysravinteiden talteenoton osalta voidaan todeta, että aiemmassa tutkimuksessa ja kehitystyössä on keskitytty vahvasti fosforin kierrättämiseen ja talteenottoon, mutta varsinkin viime vuosina kiinnostus myös typen osalta on kasvanut. Toki esimerkiksi pohjoismaissa on nähty typen rooli kiinnostavana jo pidempään, ja erityisesti Ruotsi ja Tanska ovat tehneet työtä eri menetelmien käytön mahdollistamiseen.

European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) ylläpitää listaa fosforintalteenotto- ja kierrätyslaitoksista. Laitoksia on rakennettu tasaisesti jo vuodesta 1997, ja niiden ilmoitetut talteenottokapasiteetit vaihtelevat muutamasta tonnista kymmeneen tuhansiin tonneihin vuodessa. Yli tuhansien tonnien vuosikapasiteetin laitoksia on kuitenkin vielä vain muutamia, ja suurimmat laitokset ovat vielä suunnitteilla.

Fosforin talteenottoa ja kierrätystä ovat edistäneet erityisesti Saksa, Japani, Yhdysvallat, Alankomaat, Kiina, Belgia, Israel ja Tanska. Aiemmin teknologioissa ovat korostuneet struviittiin perustuneet menetelmät, mutta varsinkin viime vuosina teknologiat ovat monipuolistuneet. Eri markkinoilla sekä kansallinen että kansainvälinen lainsäädäntö kuitenkin rajoittavat vielä talteen otetun fosforin käyttöä lannoitevalmisteissa.

HELCOM (2018) julkaisi vuonna 2018 yhteenvedon Itämeren alueen maiden ravinteiden kierrätyksen tilasta. Yleisesti ottaen kokonaisvaltaista, valmista strategiaa ravinteiden talteenoton osalta ei ollut, mutta maat edistivät erilaisia aloitteita ravinteiden kierrätykseen liittyen. Saksassa, Ruotsissa ja Tanskassa ravinteiden kierrätys on puhututtanut jo pitkään. Saksassa alkoi vuonna 2023 velvoite ottaa fosforia talteen jätevesilietteistä kaikilla jätevedenpuhdistamoilla, mikäli fosforin pitoisuus kuiva-aineesta on 2 % tai enemmän (20 g P/kg kuiva-aine). Velvoite kiristyy vuonna 2029 koskemaan puhdistamoja, joiden asukasvastineluku on suurempi kuin 100 000 ja vuonna 2032 velvoite tulee koskemaan myös yli 50 000 AVL:n puhdistamoja. Sveitsissä velvoite fosforin talteenotolle jätevedestä, jätevesilietteestä ja jätevesilietetuhkasta tulee voimaan vuonna 2026. Myös Itävaltaan on valmisteilla velvoite fosforin talteenotosta. Tanskassa on edistetty erityisesti typen talteenoton ohjeistusta ja tehokkuutta. Toisaalta on asetettu kansallisia rajoituksia jätevesilietteiden käyttöön lannoitevalmisteissa. Ruotsissa on tutkittu myös typen kierrätystä viime aikoina, mutta sielläkin kansallinen lainsäädäntö rajoittaa jätevesilietteiden käyttöä lannoitevalmisteissa.

Uusimpia fosforin talteenottolaitoksia on valmistumassa erityisesti Saksaan (Ash2®Phos, EUPHORE®) ja Ruotsiin (Ash2®Phos). Kyseiset laitokset tulevat käsittelemään jätevesilietetuhkaa. Näissä maissa voidaan olettaa kansallisen lainsäädännön seuraavan tiukasti projektien edistymistä. Typen osalta pilottilaitoksia on paljon Ruotsissa sekä Tanskassa viime aikoina. Teknologiakehitystä on käsitelty tarkemmin myöhemmin tässä raportissa.

5.6 Tutkimus- ja kehitystoiminta ravinteiden talteenoton suhteen

Ravinteiden talteenottoa ja kierrätystä jätevedestä ja jätevesilietteestä on tutkittu ja kehitetty viime vuosien aikana paljon eri puolilla maailmaa. Monissa Euroopan maissa tutkimusta ja talteenottomenetelmien kehitystä on tehty yliopistoissa ja yritysten puolesta. Tutkimuksessa ja kehitystyössä menetelmissä pääpaino on ollut selvästi fosforin talteenotossa. Vuonna 2013 muodostettu European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) ylläpitää listaa fosforintalteenotto- ja kierrätyslaitoksista jätevedenpuhdistamoilla, jotka ovat toiminnassa tai rakenteilla. ESPP:n järjestämässä konferensseissa esitellään kehitettyjä menetelmiä ja tutkimuksien tuloksia. ESPP laajentaa toimintaansa myös typen talteenottoon ja järjestää ensimmäisen työpajan tammikuussa 2023 aiheeseen liittyen.

Osa tutkituista ja kehitetyistä menetelmistä on jo aikaisemmin käytössä olleita menetelmiä ja niitä on kehitetty palvelemaan ravinteiden talteenottoa paremmin. Struviitin saostus on yksi esimerkki tällaisesta menetelmästä fosforin talteenottoon liittyen. Typen osalta ammoniumtypen strippaus vesifaasista on myös ollut jo pitkään tunnettu menetelmä.

Suomessa jäteveden ja jätevesilietteen ravinteiden talteenottoa tutkitaan muun muassa Aalto yliopistossa eri tutkimusprojekteissa. NPHarvest-prosessi on Aallon tutkijoiden kehittämä menetelmä, jossa fosfori saostetaan kemiallisesti ja typpi erotetaan kalvon avulla. Lopputuotteet ovat lannoitteeksi soveltuvia. Lisäksi muita Aallon tutkimusprojekteja ovat fosforin adsorptio, levä-sienireaktori ja vivianiittitutkimus (Aalto-yliopisto, 2021). Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY) on kehittänyt Suomen olosuhteisiin sopivan fosforin talteenottomenetelmän (RAVITA-prosessi), jota on myös jatkokehitetty yhteistyössä Jyväskylän Seudun Puhdistamon, Porvoon Veden ja Hämeen ammattikorkeakoulun (HAMK) kanssa (HSY, 2022). Gasum Oy:llä on ollut myös ravinteiden talteenottoon liittyviä hankkeita ja viimeisimmässä JÄRKKI-hankkeessa yhteistyössä HAMK:in kanssa on selvitetty jätevesilietteiden ravinteiden kierrätystä keskitetyissä ratkaisuisissa (Gasum Oy, 2022). Prizztech Oy:n ja Huittisten puhdistamo Oy:n yhteistyöhankkeessa kehitetään fosforin talteenottoa struviittina jätevedenpuhdistamolla, jossa on käytössä biologinen fosforin poisto. Suomessa Ympäristöministeriö on rahoittanut tutkimusta ja kehitystä ravinteiden kierrätyksen ohjelman (Raki) rahoituksen avulla. Lista kaikista kyseisen rahoituksen saaneista hankkeista ja tulevista rahoitusmahdollisuuksista löytyy ympäristöministeriön nettisivuilta. Ravinteiden talteenotto on ollut viime vuosina myös usean opinnäyte-, kandi- ja diplomityön aiheena.

Aikaisemmissa selvityksissä, kuten SYKE:n raportissa ”Jätevesien ravinteet kierto on turvallisesti ja tehokkaasti” vuonna 2021 (Lehtoranta ym. 2021), on listattu tutkimustarpeita liittyen eri menetelmiin ja niiden vertailtavuuteen. Raportin mukaan tulevissa tutkimuksissa tulisi kiinnittää erityisesti huomiota eri sovelluksien ravinteiden talteenottoasteeseen, energiatehokkuuteen ja kustannuksiin mittakaava huomioon ottaen. Lopputuotteiden käytettävyys lannoitteina tai soveltuvuus lannoitevalmistukseen vaatii myös lisätutkimusta erityisesti turvallisuuden näkökulmasta. Lopputuotteiden turvallisuuden vaikuttavat eri haitta-aineet sekä mikromuovi ja niiden vaikutukset ympäristöön, niin maaperään kuin maaperän eliöille. Eri menetelmien elinkaaren aikaisista ympäristövaikutuksista on saatavilla vielä vain vähän tietoa.

5.7 Haastatteluiden yhteenveto

Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa toteutettiin sidosryhmien haastatteluja, joiden avulla pyrittiin ymmärtämään yhdyskuntajätevesistä talteen otettujen fosforin ja typen lannoitekäytön mahdollisuuksia, haasteita sekä edistäviä ja hidastavia tekijöitä käytännön tasolla.

Ensimmäisen vaiheen haastatteluita pyrittiin kohdistamaan tasapainoisesti jätevesien käsittelyn ammattilaisiin ja tutkijoihin, kierrätysravinteita tuottaviin tahoihin sekä lannoitteita käyttäviin toimijoihin. Haastatteluja suoritettiin 8 kappaletta aikavälillä 3.-19.12.2022.

Yleisellä tasolla yhdyskuntien jätevesien ravinteiden talteenotto nähtiin positiivisessa valossa. Ravinteiden, erityisesti fosforin, osalta tunnistettiin julkisessa keskustelussa omavaraisuuden roolin korostuminen Ukrainan kriisin johdosta kevään 2022 aikana.

Talteenottoteknologioita on jonkin verran pilotoitu, mutta valmista teknologiaa, ns. täyden mittakaavan demonstroituja hankkeita, jolla kierrätysravinteita voitaisiin hyödyntää tehokkaasti, ei ole vielä saatavilla. Teknologioiden kehityksen toivottiin jatkuvan, ja sen nähtiin olevan avainasemassa kierrätysravinteiden läpimurron saavuttamisessa.

Kierrätysravinteista jalostettujen lannoitteiden käytön osalta merkittävimmiksi hidastaviksi tekijöiksi tunnistettiin haitta-ainepitoisuudet sekä niihin liittyvien standardien puuttuminen. Toisena merkittävänä tekijänä oli käyttökelpoisuus kasveille ja liukoisen ravinteen osuus lopullisessa lannoitetuotteessa.

Haitta-aineista keskustellessa korostuivat mikromuovit sekä orgaaniset yhdisteet, joista on saatavilla vähemmän tutkimustietoa kuin raskasmetalleista. Läpi arvoketjun toivottiin kattavaa tutkimusta ja konsensusta kaikkien haitta-aineiden turvallisista raja-arvoista ja standardoituja, koko arvoketjussa hyväksytyjä vaatimuksia lannoitetuotteen sisällölle, jotta markkinaehtoinen kysyntä voisi kasvaa. Koko toimialalla sovittujen standardien tulisi kattaa laajempi, esimerkiksi Euroopan taso, jotta eri markkinoilla ei jouduta epäterveeseen kilpailuasetelmaan, ja viljelijät voivat huoletta käyttää kierrätysravinteita sisältäviä lannoitevalmisteita ilman pelkoa sadon soveltuvuudesta eri loppumarkkinoille.

Kierrätysravinteita sisältävien lannoitevalmisteiden osalta käyttökelpoisuus nousi myös esiin keskusteluissa. On kuitenkin huomattava, että varsinkin viime aikoina viljelijöiden kiinnostus kierrätysravinteita sisältäviin lannoitevalmisteisiin on noussut. Orgaanisten lannoitevalmisteiden käyttöön on ohjeistusta ja apua jo saatavilla, mutta niiden käyttö on kuitenkin kokonaisuudessaan vähäistä. Haastatteluissa nostettiin esiin, että peltomaa on viljelijälle erittäin tärkeä omaisuuserä ja orgaanisten lannoitteiden käyttöön liittyy varautuneisuutta, mikäli käytöllä on vaikutuksia maan hyödyntämiseen.

Keskusteluissa nostettiin myös esille typen rooli kierrätysravinteena, joka on vasta viime aikoina noussut vahvasti fosforin rinnalle puhuttaessa kierrätettävistä ravinteista ja niiden potentiaalista. Lisäksi nostettiin esille yhdyskuntien jätevesistä pohjautuvien ravinteiden käytön imagokysymys. Nykyisessä markkinassa kuluttajilla on varauksia jätevesipohjaisten ravinteiden käyttöön lannoitteissa, ja jotta markkinaehtoinen muutos tapahtuisi, täytyy myös kuluttajien asenteet saada käännettyä positiivisempaan suuntaan. Tätä tukee vahvasti edellä mainittu tarve elintarviketurvallisuuden tutkimukselle, jonka avulla voidaan asettaa standardit turvallisille tuotteille konsensuksen vallitessa.

6. Jätevesilietteen hyötykäyttöön liittyvät lainsäädännön uudistukset

Kansallinen lannoitelaki (711/2022) on hiljattain uudistunut. Lannoitelaki sisältää EU:n lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) edellyttämän kansallisen toimeenpanon, jonka myötä siirrytään EU:n lannoitevalmisteasetuksen kanssa yhtenevään lannoitevalmisteiden tuoteluokitukseen. Valmisteilla olevalla maa- ja metsätalousministeriön asetuksella lannoitevalmisteista annetaan tarkempia säännöksiä lannoitevalmisteiden tuoteluokista ja niiden sallituista ainesosista sekä tuoteluokkien ja raaka-aineiden laatuvaatimuksista. Kansallisen maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista odotetaan valmistuvan kevään 2023 aikana.

EU:n lannoitevalmisteasetuksessa (2019/1009) vahvistetaan kriteerit, joiden mukaisesti jätedirektiivissä (2008/98/EY) määritellyn jätteen muodostava materiaali voi lakata olemasta jätettä, jos se sisältyy vaatimustenmukaiseen EU-lannoitevalmisteeseen. Jätteeksi luokittelun päättymisen tavoitteena on tehostaa raaka-aineiden käyttöä edistämällä orgaanisista tai uusiöraaka-aineista valmistettujen lannoitteiden pääsyä EU:n sisämarkkinoille CE-merkittynä. EU-lannoitevalmisteella tarkoitetaan lannoitevalmistetta, jolle annetaan CE-merkintä, kun se asetetaan saataville markkinoille. Asetuksessa lannoitevalmisteet luokitellaan toimintaperusteisiin tuoteluokkiin (PFC, *product function category*) ja lannoitevalmisteiden raaka-aineet ainesosaluokkiin (CMC, *component material category*). Yhdyskuntajäteveden käsittelylaitosten jätevesien ja jätevesilietteiden käyttö EU:n lannoitevalmisteasetuksen mukaisissa ainesosaluokissa on sallittu ainesosaluokassa (CMC) 12 saostetut fosfaattisuolat ja -johdannaiset ja ainesosaluokassa (CMC) 13 termisessä hapetuksessa muodostuvat materiaalit tai niiden johdannaiset. Lisäksi tuotteen valmistusta koskee vaatimusten mukaisuuden arviointi.

EU:n lannoitevalmisteasetuksen mukaisten EU-lannoitevalmisteiden CE-merkintä mahdollistaa tuotteiden vapaan liikkuvuuden EU-markkinoilla. EU:n lannoitevalmisteasetusta ei kuitenkaan harmonisoida täysin kansalliseen lainsäädäntöön, vaan kansalliseen lainsäädäntöön valmisteilla olevilla asetuksilla voidaan säätää esim. kansallisesti hyväksytyistä ainesosista (Maa- ja metsätalousministeriö, 2020). Kansalliseen lannoitevalmisteiden ainesosaluetteloon voidaan myös lisätä uusia ainesosia, mikäli voidaan osoittaa, että niistä valmistettu lannoitevalmiste ei aiheuta riskejä ihmisten, eläinten tai kasvien terveydelle, turvallisuudelle taikka ympäristölle ja ne parantavat kasvien kasvua tai kasvuolosuhteita taikka lannoitevalmisteiden käytettävyyttä. Tuotteita, joilla ei ole CE-merkintää, on siis edelleen mahdollista saattaa kotimaan markkinoille kansallisen lainsäädännön mukaisesti. Kansallisen lainsäädännön ei arvioida merkittävästi muuttavan jätevesilieteperäisten lannoitevalmisteiden kotimaan markkinaa. Valvovana viranomaisena Ruokavirasto ylläpitää lannoitevalmisteiden ainesosaluetteloa ja uuden ainesosan sisällyttämistä ainesosaluetteloon haetaan Ruokavirastolta.

EU:n lannoitelaisissa vastavuoroisella tunnustamisella pyritään sallimaan tuotteiden vapaa liikkuvuus EU:n sisämarkkinoilla. Vastavuoroisen tunnustamisen periaatteen mukaan yhdessä jäsenmaassa laillisesti markkinoilla olevien tuotteiden on lähtökohtaisesti päästävä kaikkien jäsenvaltioiden markkinoille, vaikka tuote ei täysin vastaisikaan jäsenmaan kansallisia teknisiä ja laadullisia määräyksiä. Vastavuoroisen tunnustamisen perusteella markkinoille saatettaville lannoitevalmisteille on haettava lannoitelain (711/2022) mukaista ennakkolupaa Ruokavirastolta. Ruokavirasto voi valvovana viranomaisena antaa kielteisen päätöksen asiassa perustellusta syystä. Tällaisia syitä voivat olla esimerkiksi haitalliset aineet, taudinaiheuttajat, kasvien karanteenituhoojat ja korkea seleenipitoisuus. Jätettä sisältävien lannoitevalmisteiden markkinoille saattaminen vastavuoroisen tunnustamisen periaatteella ei myöskään ole sallittua.

Lannoitelain ja sen nojalla säädetyn *Valtioneuvoston asetuksen fosforia sisältävien lannoitevalmisteiden ja lannan käytöstä 64/2023* (fosforiasetus, voimaan 17.1.2023) mukaan fosforin käyttöön liittyvät vaatimukset koskevat jatkossa myös viljelijöitä, jotka eivät aiemmin ole olleet fosforin käytön ympäristökorvauksia koskevien rajoitusten piirissä sekä viher- ja ympäristörakentamisesta, jonka fosforin käyttöä ei myöskään ole aiemmin säännelty. Fosforiasetuksessa määritellään ylärajat fosforin käytölle hehtaarikohtaisesti. Asetuksessa esitetyt, erityisesti kasveille helposti saatavilla olevan liukoisen fosforin raja-arvot viher- ja ympäristörakentamisessa voivat hankaloittaa tai jopa estää jätevesilietteestä valmistettujen lannoitevalmisteiden käytön viherrakentamisessa (Viherympäristöliitto ry:n lausunto fosforiasetuksesta). Maa- ja puutarhataloudessa lannoituksessa puhdistamolietteen sisältämästä kokonaisfosforista huomioidaan 60 % ja tuhkan ja biohiilen kokonaisfosforista 40 %. Osuudet perustuvat puhdistamolietteen sisältämän kasveille käyttökelpoisen kokonaisfosforin määrään. Puhdistamolietteessä fosfori on kemiallisesti saostettu vahvoihin kemiallisiin sidoksiin, mikä rajoittaa fosforin käyttökelpoisuutta kasveille (LUKE 2023).

Yhdyskuntajätevesidirektiivi on uudistumassa. EU-komissio on 26.11.2022 julkaissut yhdyskuntajätevesidirektiivin muutosehdotuksesta luonnoksen. Yhdyskuntajätevesidirektiivi (91/271/ETY, 1991) koskee yhdyskuntajätevesien keräilyä, käsittelyä ja vesistöön johtamista. Uudella direktiiviehdotuksella pyritään lisäksi hillitsemään ilmastonmuutosta, tehostamaan laitosten energiatehokkuutta sekä edistämään ravinteiden kierrätystä. Yhdyskuntajätevesidirektiivin muutosehdotuksesta käydään neuvotteluita vuoden 2023 ajan ja se hyväksytään ja julkaistaneen arviolta vuonna 2024, jonka jälkeen seuraa kansallinen toimeenpano muutaman vuoden kuluessa.

Ennakkotietojen mukaan uudistuva yhdyskuntajätevesidirektiivi laajenee koskemaan yli 1 000 asukasvastineluvun jätevedenpuhdistamoita, ravinteiden poistovelvoitteet tulevat tiukentumaan ja haitta-aineille asetetaan poistovelvoitteita. Kokonaisfosforin minimipoistovelvoitteeksi asetetaan 90 % ja kokonaistypen minimipoistovelvoitteeksi 85 %. Ravinteiden talteenottoon liittyvä delegoitu asetus tullaan valmistelemaan myöhemmin.

Uudella direktiiviehdotuksella pyritään tehostamaan laitosten energiatehokkuutta ja ohjaamaan laitoksia uusiutuvan energian käyttöön. Energianeutraalisuusvaatimukset voivat ohjata laitoksia biokaasuntuotantoon, mikä voi mahdollisesti vaikuttaa ravinteiden talteenottoteknologioiden valintoihin. Laitoksilta ei kuitenkaan edellytä omaa energiantuotantoa, ja laitoksen toimintaan ja ravinteiden talteenottomenetelmiin käytettävän uusiutuvan energian voi hankkia ostoenergiana.

Uudistuva yhdyskuntajätevesidirektiivi liittyy vuoteen 2030 ulottuvaan EU:n maaperästrategiaan, jonka tavoitteena on mm. vähentää ravinnehävikkiä vähintään 50 %, kemiallisten torjunta-aineiden kokonaiskäyttöä ja -riskiä vähintään 50 % ja vaarallisempien torjunta-aineiden käyttöä 50 % vuoteen 2030 mennessä maaperän hyvän terveydentilan saavuttamiseksi.

Puhdistamolietteen käyttöä maataloudessa säätelevä puhdistamoliettedirektiivi (86/278/ETY) vuodelta 1986 on tällä hetkellä evaluointivaiheessa. Puhdistamoliettedirektiivi voitaneen tulevaisuudessa mahdollisesti yhdistää yhdyskuntajätevesidirektiiviin.

7. Suomen infrastruktuurin ja ympäristöolosuhteiden vaikutukset

Yhdyskuntajätevesien ravinteiden kierrätys vaatii ravinteiden talteenoton joko jätevesien puhdistuksen tai lietteen käsittelyn yhteydessä tai kuivatun ja mahdollisesti jatkokäsittelyn lietteen kuljetuksen talteenotto paikalle. Mikäli lannoitevalmiste ei valmistu talteenotto paikalla, tulisi talteen otetut ravinteet tämän jälkeen kuljettaa vielä lannoitteen tuotantolaitokselle.

7.1 Etäisyydet ja logistiikka

Ravinteet eivät jakaudu tasaisesti maantieteellisesti, sillä eläintalous ja viljely painottuvat Suomessa eri alueille. Fosforia on kertynyt myös lannanlevityksen myötä pelloille epätasaisesti, jolloin sitä on päässyt huuhtoutumaan vesistöihin erilaisia määriä alueellisesti. (LUKE 2022d). Lannoitteiden osalta kuljetuskustannukset puhuttavat (mm. Yle 2022a), ja ympäristönäkökulmat sekä taloudellinen tehokkuus huomioon ottaen ylimääräistä kuljettamista prosessin kaikissa vaiheissa tulee välttää. On myös huomioitava, että mitä tarkemmin yhdyskuntajätevesien ravinteet voidaan ottaa talteen ilman sivutuotteita, joihin ravinteet ovat sitoutuneet (esim. vesi), sitä tehokkaampaa ravinteiden kuljettaminen on. Erityisesti laimeiden seosten kuljettaminen on kallista, mikä voisi tulla kyseeseen, jos talteenotto ei tapahdu vedenpuhdistamon yhteydessä esimerkiksi puhdistamon pienen koon vuoksi. Osana taloudellista jatkoselvitystä onkin syytä arvioida, kuinka skaalattavia eri menetelmät ovat – mikäli laiteinvestointi on suuri ja soveltuu vain suurimpiin puhdistamoihin, lopullinen kierrätettyjen ravinteiden taso voi jäädä potentiaalisesta maksimista huomattavasti.

Mikäli laiteinvestoinnit vaativat suhteellisen suuren määrän jätevesilietettä ollakseen kannattavia, täytyy tarkastella ensin käsiteltyjen lietteiden kuljetusta puhdistuslaitokselta keskitettyihin ravinteiden talteenottolaitokseen, jonka jälkeen talteenottolaitokselta ravinteet tulee kuljettaa vielä lannoitetuotantolaitokselle.

JÄRKKI-hankkeessa (HAMK 2022) arvioitiin yhdyskuntajätevesien ravinne- ja energiapotentiaalia. Tutkimuksessa vertailtiin mahdollisten keskitettyjen biokaasu- ja ravinteiden talteenottolaitosten optimaalisia sijainteja ja kokoja. Työssä esitettiin kahden tai neljän keskitetyn laitoksen skenaariot, ja lisäksi esitettiin vaihtoehtona 300 kilometrin rajoite kuljetusmatkassa, millä parannetaan lietteen ravinteiden talteenoton ja energiapotentiaalin kannattavuutta.

Keskitettyjen laitosten vaihtoehdossa talteenottolaitokset keskittyisivät suurimpien ihmiskeskittymien lähelle, jättäen osan Pohjois- ja Itä-Suomen jätevesien ravinteista kierrätyksen ulkopuolelle.

7.2 Ympäristöolosuhteet

Suomen peltomaalle on ominaista vähäinen ravinnepitoisuus (MMM 2023). Lannoitusta joudutaan käyttämään aktiivisesti, jotta kasvit kasvavat tasapainoisesti. Ilmasto-olosuhteiden takia Suomessa menestyvät parhaiten lyhyen kasvukauden viljelykasvit ja lajikkeet. Lisäksi viljelymahdollisuuksiin vaikuttaa alhainen tehoisa lämpösumma, hallanvaara sekä syyssateet. Kylmä talvi auttaa tuholaisten ja tautien karkottamisessa mutta estää myös joidenkin kasvien viljelyn.

Lannoitevalmisteiden käyttöön liittyy paljon rajoituksia. Lanta ja orgaaniset lannoitevalmisteet tulee levittää huhtikuun ja lokakuun välillä. Sekä maatalousmaa että vesistöt kuormittuvat, mikäli viljelyä tai lannoitusta ei suoriteta oikeaoppisesti, ja esimerkiksi oikeanlaisella lannoittamisella voidaan rajata ympäristövaikutuksia merkittävästi. Suomessa on viime aikoina puhuttanut varsinkin vesistöjen rehevöityminen ravinteiden huuhtoutumisen vuoksi. Puhdistamolietettä onkin käytetty nimenomaan sen maanparannusvaikutuksen vuoksi, vähentämään mm. ravinteiden huuhtoutumista ja eroosiota sekä tukemaan pieneliötoimintaa ja maan rakennetta (Lehtoranta et al. 2021).

8. Tekninen menetelmäselvitys

8.1 Johdanto

Kappaleessa 2 asetetun tavoitteen mukaan tässä teknisessä menetelmäselvityksessä on tavoitteena selvittää olemassa olevia fosforin ja typen talteenottomenetelmiä jätevedestä, jätevesijakeista ja jätevesilietteestä. Lähtökohtaisesti tavoitteena on saada ravinteet osaksi kiertotaloutta ja hyödyntää ne lannoitteina tai muussa sopivassa hyötykäyttötarkoituksessa.

Tämän selvityksen ensisijaisena lähtökohtana on löytää ja arvioida Suomeen soveltuvia ravinteiden talteenottomenetelmiä. Selvityksessä tarkasteltavien menetelmien osalta on otettu huomioon niiden tekninen kypsyyssaste (TRL); soveltuvuus Suomen jätevesihuoltoon, infrastruktuuriin ja ympäristöolosuhteisiin; saavutettava ravinteiden talteenottoaste ja lopputuotteiden turvallisuus sekä käytettävyyys. Menetelmiä tarkastellessa on huomioitu myös niiden tekninen haastavuus, operointivarmuus, skaalautuvuus ja suunniteltu mittaluokka.

Tekniikan kypsyyssaste, eli Technology readiness level TRL kuvaa teknologian kypsyyssastetta asteikolla 1-9. TRL on alun perin Kansallisen avaruushallinnon (NASA) kehittämä ja myöhemmin avaruusteknologille standardoitu (ISO 16290) luokittelumenetelmä, jota myös Euroopan avaruusjärjestö (ESA) käyttää. TRL-luokittelu on yleistynyt tutkimuslaitoksissa ja teollisuudessa kuvaamaan kehitettävien teknologioiden kypsyyssastetta. TRL-asteikon selitteet ovat seuraavat:

TRL 1 - Tekniikan pääperiaatteet ja havainnot on dokumentoitu

TRL 2 - Tekniikan konsepti on laadittu

TRL 3 - Tekniikan konseptin toimivuus on osoitettu kokeellisesti

TRL 4 - Tekniikan toimivuus on todennettu laboratoriomittakaavassa

TRL 5 - Tekniikka toimivuus on todennettu soveltuvassa toimintaympäristössä

TRL 6 - Tekniikasta on toimiva prototyyppi, jota on testattu soveltuvassa/aidossa toimintaympäristössä

TRL 7 - Tekniikan prototyyppin suorituskykyä on testattu/demonstroitu aidossa toimintaympäristössä

TRL 8 - Tekniikka on todettu toimivaksi ja valmis käyttöön aidossa toimintaympäristössä

TRL 9 - Tekniikka on valmis ja osoitettu toimivaksi aidossa toimintaympäristössä

Talteenottomenetelmien lähtökohdat käytettävän jakeen ja käyttöönottavuuden suhteen vaihtelevat menetelmien välillä. Käyttöönoton osalta merkittävää ovat mahdolliset muutokset jätevedenpuhdistamon olemassa oleviin prosesseihin, jotta kyseinen menetelmä voidaan ottaa käyttöön. Osa menetelmistä voidaan ottaa osaksi olemassa olevaa prosessiketjua ilman muutoksia nykyisiin prosesseihin. Tietty menetelmät vaativat suhteellisen pieniä muutoksia puhdistamolla, esimerkiksi muutoksia saostuskemikaalin annostelussa. Osalle menetelmistä on kriittistä muuttaa olemassa oleva kemiallinen fosforin saostus biologiseksi fosforinpoistoksi, mikä voidaan katsoa merkittäväksi muutokseksi. Polttotekniikat, kaasutus ja torrefiointi voidaan katsoa olevan yksi osakokonaisuus, sillä Suomessa nämä eivät ole toistaiseksi yleistä tekniikkaa ja varsinainen ravinteiden talteenotto tapahtuu tuhkasta.

On tärkeää huomioida, että puhdistamokohtaiset lähtökohdat vaikuttavat merkittävästi talteenottomenetelmien soveltuvuuteen ja menetelmiä ei voida suoranaisesti asettaa paremmuusjärjestykseen. Teknisen toteutuksen ja kustannustehokkuuden puolesta osa menetelmistä ei sovellu yksittäisille puhdistamoille, vaan esimerkiksi keskitetty käsittely voi olla parempi vaihtoehto. Osa menetelmistä voidaan harkita myös liikkuvina ratkaisuuina, jotka kiertävät käsittelyssä ravinnerikkaita jakeita jätevedenpuhdistamoilla.

Olemassa olevien talteenottomenetelmien tarkastelu on aloitettu listaamalla menetelmiä, joista on löydettävissä tietoa kirjallisuudesta. Ensimmäinen karsinta on tehty menetelmien teknologian kypsyyden sekä maantieteellisen sijainnin mukaan. Tässä karsinnassa menetelmät, joiden tekninen valmiusaste on alle 6 tai niitä ei ole testattu eikä pilotoitu Euroopassa, on karsittu pois.

Tässä selvityksessä on keskitytty fosforin ja typen talteenottoon, eikä esimerkiksi hiilen talteenottoa ole tarkasteltu. Mikäli menetelmällä on tähän merkittävä vaikutus, on siitä mainittu sen kuvauksessa, mutta se ei ole ollut kriteerinä tarkastellessa eri menetelmiä.

8.2 Talteenottomenetelmät

Ravinteiden talteenottomenetelmiä on kehitetty paljon. Seuraavaksi on esitetty listaus eri menetelmistä kirjallisuustutkimuksen pohjalta. On huomioitava, ettei listaus ole täydellinen, sillä osa menetelmistä on vielä kehityksen alussa ja osan menetelmien kehityksen voidaan arvioida loppuneeksi, mikäli niistä ei ole saatavilla tietoa viime vuosilta. Tämän selvityksen osalta on keskitytty menetelmiin, joilla voidaan ottaa talteen fosforia ja tyyppiä jätevedestä, jätevesilietteestä tai jätevesilietetuhkasta. Tehdyn kirjallisuuskatsauksen pääpaino on ollut Euroopan markkinoilla.

Menetelmät, joilla tuotetaan ensisijaisesti maanparannusaineeksi soveltuvaa ainesta, kuten biohiiltä, ovat osana listausta. Osa ravinteista, etenkin fosforista, päättyy niiden lopputuotteisiin.

Jäteveden nestejakeet

- Struviitin tai kalsiumfosfaatin saostus
 - Useita kaupallisia toimijoita
- Strippaus
- Kalvomenetelmät
- NPHarvest
- Aqua2N
- Levä- ja mikrobituotanto

Jätevesiliete

- RAVITA™ (kemiallinen liete jälkikäsittelystä)
- Fosforin talteenotto vivianiittina
- Poltto
 - Endev-teknologia
 - EuPhore-teknologia
- Kaasutus
- Torrefiointi
- Pyrolyysi
 - PYREG
- Märkähiilto (Hydrothermal carbonization, HTC)
 - TerraNova, C-Green
- Hydrotermien nesteytys (Hydrothermal Liquefaction, HTL)
- Märkä-kemiallinen liuotus ja struviitin/kalsiumfosfaatin saostus
 - Stuttgart, Gifhorn ja Budenheim (ExtraPhos) -prosessit
- Ylikriittinen vesikaasutus (Supercritical Water Gasification, SCWG)
- Ylikriittinen vesihapetus (Supercritical Water Oxidation, SCWO)
 - Aqua Reci

- Märkähapetuksen (Wet Oxidation, WO) ja nanosuodatuksen yhdistelmä
 - PHOXNAN
- Valkofosforin talteenotto
 - FlashPhos

Jätevesilietetuhka

- Märkäkemialliset talteenottomenetelmät
 - Ash2Phos, TetraPhos, PHOS4Green, PASH
- Terminen käsittely (tai metallurginen käsittely)
 - Mephrec
- Kemiallisen ja termisen käsittelyn yhdistelmä
 - AshDec
- Ioninvaihtoprosessit
 - BioCon

Talteenottomenetelmistä ne, joiden tekninen kypsyy (TRL) on 6-7 tai yli ja niiden katsotaan soveltuvan Suomeen, on valittu tarkempaan tarkasteluun. Soveltuvuutta Suomeen on arvioitu menetelmän teknisten ominaisuuksien mukaan ja edellytyksenä on, että siitä on käyttökokemuksia muista Pohjoismaista tai Euroopasta.

Tarkasteluun valikoituivat seuraavat menetelmät:

- Struviitin saostus (Kappale 8.2.1)
- Strippaus (Kappale 8.2.2)
- Kalvomenetelmät (Kappale 8.2.3)
- NPHarvest (Kappale 8.2.4)
- Aqua2N (Kappale 8.2.5)
- RAVITA™ (Kappale 8.2.6)
- Fosforin talteenotto vivianiittina (Kappale 8.2.7)
- Pyrolyysi (Kappale 8.2.8)
- Poltto (Kappale 8.2.9)
 - Endev (Kappale 8.2.9.1)
 - EuPhoRe (Kappale 8.2.9.2)
- Märkäkemialliset talteenottomenetelmät tuhkasta (Kappale 8.2.10)
 - Ash2Phos
 - TetraPhos

Tarkasteluun valitut menetelmät on kuvattu tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Alemman TRL-tason menetelmistä on kirjattu seuraavan kappaleen loppuun lyhyet yhteenvedot. Lisäksi menetelmät, joiden kehityksen uskotaan loppuneen, on listattu kappaleen lopussa.

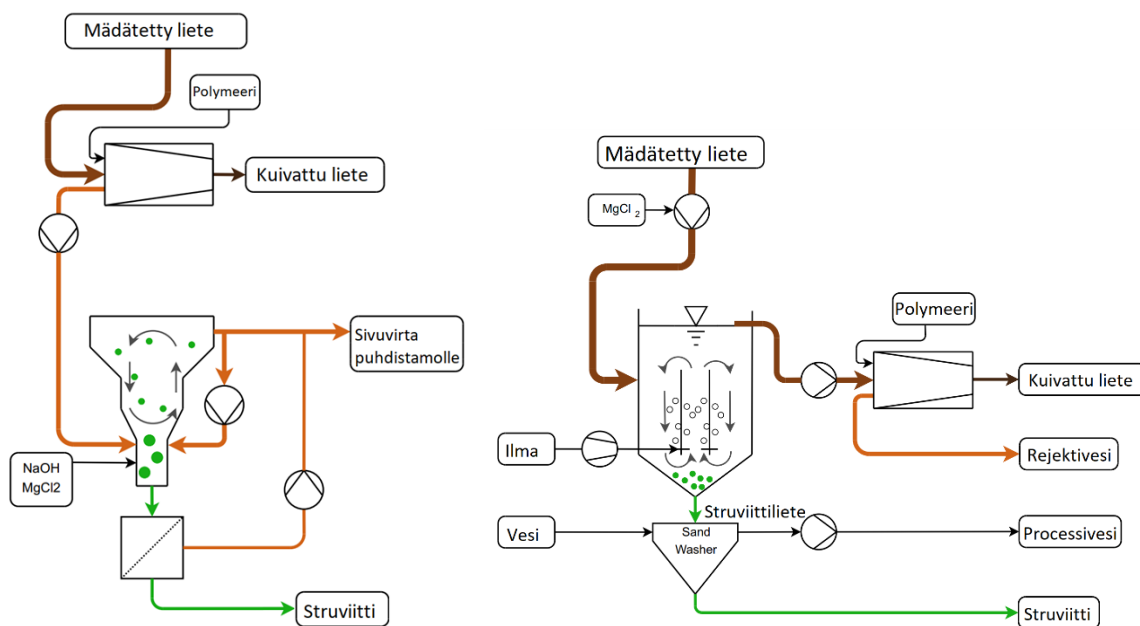
8.2.1 Struviitin saostus

Jätevedenpuhdistamolla, jossa fosfori poistetaan biologisesti, voidaan jätevesilietteeseen sitoutunut fosfori ottaa talteen mädätetystä lietteestä, mädätyksen tai lietteen kuivauksen rejektivesistä tai muista nestemäisistä jätevesijakeista, joissa on korkea fosfaattipitoisuus. Fosfori saostetaan struviittina ($MgNH_4PO_3$) lisäämällä magnesiumia, esimerkiksi $MgCl_2$ - tai MgO -muodossa. Magnesium, ammoniumtyppi ja fosfaatti sitoutuvat struviitiksi moolisuhteessa 1:1:1.

Struviitti on hidasliukoinen lannoite, jonka ravinteet (N, P ja Mg) ovat helposti kasvien käytettävissä (Römer, 2013). Riippuen ravinteiden pitoisuuksista käsiteltävässä vesijakeessa, voidaan struviittisaostusta tehostaa lisäämällä ammoniumtyyppiä tai fosforia. Vaihtoehtoisesti fosfori voidaan saostaa käyttämällä magnesiumin sijaan kalsiumia, jolloin lopputuotteena saadaan kalsiumfosfaattiyhdisteitä.

Struviittisaostus on yleisin fosforin talteenottomenetelmä ja Euroopassa on käytössä, rakenteilla tai suunnitteilla noin 50 täyden mittakaavan laitosta. Struviitin talteenottomenetelmistä on useita kaupallisia versioita, ja kullakin menetelmällä on omat vahvuutensa. Suurimpia toimijoita Euroopassa ovat AirPrex[®], ANPHOS[®], NuReSys[®], Pearl[®] ja Phosphogreen[™]. Struviitin saostus rajoittuu usein puhdistamoille, joilla on biologinen fosforinpoisto sekä mädättämö (Kabbe 2019). Huittisten puhdistamolla Suomessa on testattu fosforin talteenottoa struviittina tiivistämön rejektivedestä ja tulokset ovat olleet lupaavia (Halinen 2022).

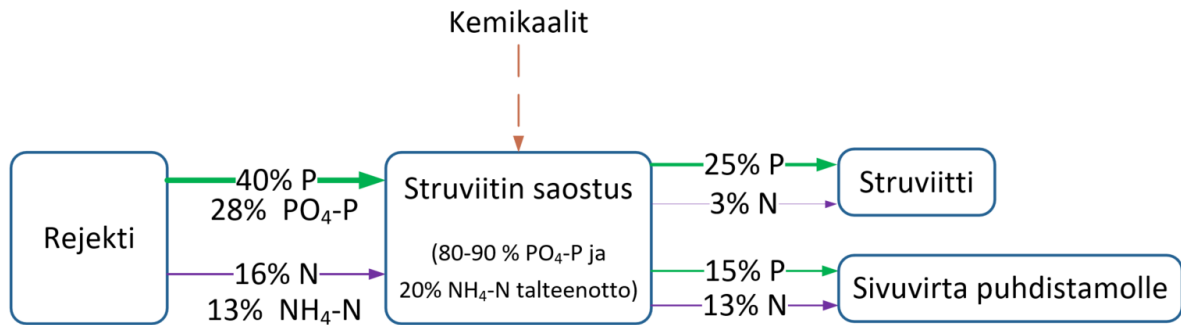
Kuvassa 5 on esitetty vasemmalla struviittisaostus mädätteen rejektivedestä Pearl[®]-menetelmällä ja oikealla mädätetystä lietteestä AirPrex[®]-menetelmällä. Eri menetelmät poikkeavat tekniikalta hieman toisistaan, mutta yleisesti niiden toimintaperiaate on samankaltainen. Struviitin saostus vaatii magnesiumlisäyksen ja pH:n säädön. Esimerkiksi Pearl[®]-menetelmässä pH:n säätö on toteutettu annostelemalla lipeää ja AirPrex[®]-menetelmässä puolestaan ilmastamalla. Struviitin muodostuminen tapahtuu kiteytysreaktorissa, jonka alaosaan laskeutuva struviitti saadaan talteen.



Kuva 5. Struviitin talteenotto, vasemmalla Pearl-menetelmä mädätteen rejektivedelle ja oikealla AirPrex-menetelmä mädätteelle.(muokattu, P-REX 2015)

Menetelmästä riippuen biologisesti fosforia poistavalle jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista voidaan saada talteen noin 10-20 % struviittina, kun syötteenä on mädäte tai mädätyksen rejektivesi. Mikäli talteenottoon ohjataan muitakin ravinnerikkaita virtoja, kuten tiivistämön rejektivesi, on mahdollista saada talteen noin 20-35 % puhdistamolle tulevasta fosforista. Esikäsittelemällä liete ennen mädätystä talteenottoaste on jopa 45-50 % puhdistamolle tulevasta fosforista. (ESPP ym. 2022)

Eri menetelmillä saavutettavista talteenottoasteista on heikosti tietoja kirjallisuudessa, mutta teoreettisesti on mahdollista saada talteen noin 80-90 % syötteen sisältämästä liukoisesta fosforista ja noin 20 % ammoniumtypestä. Kuvassa 6 on esitetty struviittisaostuksen massatase fosforin ja typen osalta biologisesti fosforia poistavalle jätevedenpuhdistamolle, jolla ei ole mädätystä (kts. Kuva 4). Esitetyn massataseen mukaan jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista saadaan noin 25 % talteen ja tyyestä noin 3 %. Kuten edellä on mainittu, struviittisaostuksen talteenottoaste riippuu käsiteltävästä jakeesta tai jakeista sekä mahdollisesta esikäsittelystä.



Kuva 6. Struviitin talteenoton massatase rejektivedelle puhdistamolla, jossa on biologinen fosforinpoisto.

Lopputuotteena saatavaa struviittia voidaan käyttää suoraan lannoitteena, mikäli ravinnesuhteet ovat oikeat lannoitettavalle alueella. Struviitti soveltuu olomuodoltaan nykyisin käytössä olevalle levityslaitteistolle. Lopputuotteen laatu on riippuvainen käytettävän syötteen laadusta. Useammassa tutkimuksessa raskasmetallien pitoisuuksien on havaittu olevan alhaisia ja jopa alhaisempia kuin kaupallisten lannoitteiden (Antonini ym. 2012, Latifian ym. 2012, Forrest ym. 2008). Orgaanisista haitta-aineista ja mikromuovien pitoisuuksista lopputuotteissa on saatavilla vain vähän tietoa. AirPrex® ja ANPHOS® lopputuotteista on tutkittu orgaanisia haitta-aineita ja tuloksien mukaan pitoisuudet ovat olleet hyvin alhaisia tai aineita ei ole havaittu ollenkaan (Egle ym. 2016).



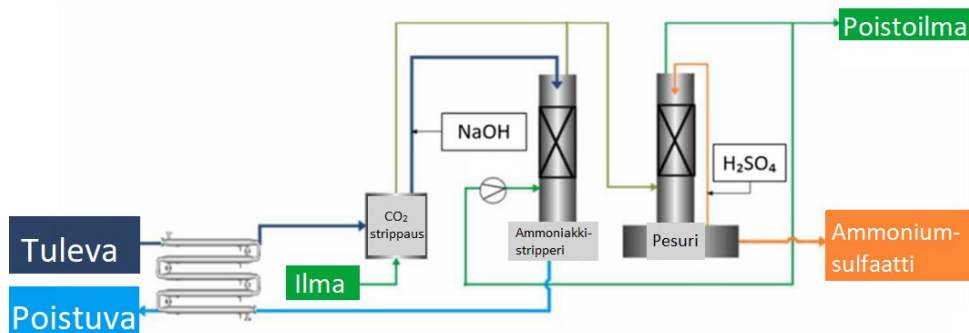
Kuva 7. Lopputuotteena saatava struviitti (Balslev 2022)

Struviittisaostuksen taloudellisia hyötyjä jätevedenpuhdistamolle ovat pienemmät huoltokustannukset (esim. putkien kalkkeutuminen) ja alhaisempi puhdistusprosessiin palautuva ravinnekuormitus. Fosforin talteenottoastetta voidaan tehostaa myös ennen mädätystä tapahtuvalla lietteen esikäsitteilyllä. Mahdollisia vaihtoehtoja ovat biologinen hapotus ja/tai terminen tai kemiallinen hydrolyysi. (Kabbe 2019).

8.2.2 Strippaus

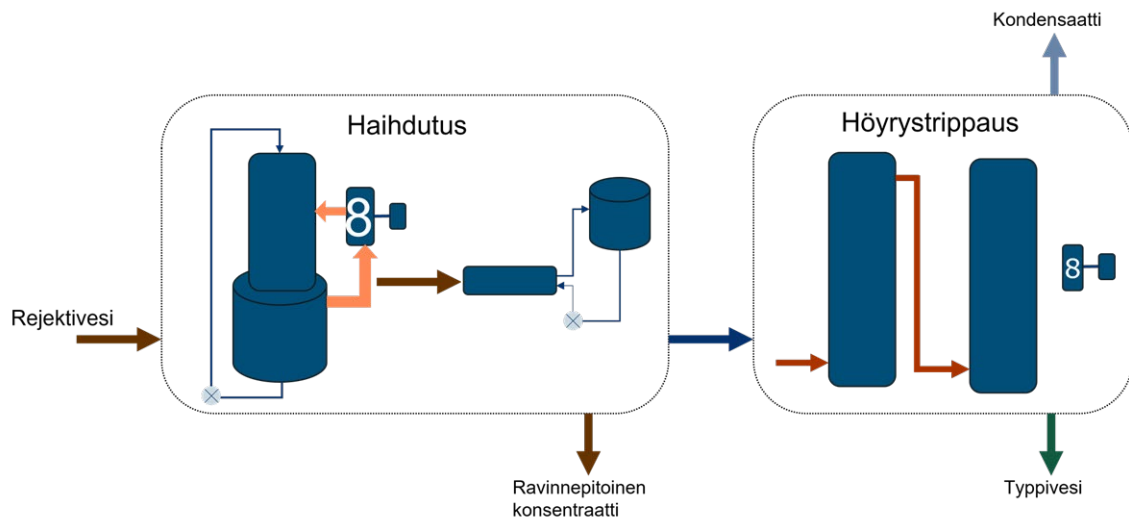
Strippausprosessilla voidaan ottaa talteen tyyppeä nestejakeesta, jolloin lopputuotteena syntyy tyypillisesti joko ammoniumsulfaatti- tai nitraattiliuosta tai ammoniakkivettä. Nestejakeesta, josta ammoniumtyppi otetaan strippaamalla talteen, tulee olla suhteellisen alhainen kiintoainepitoisuus. Strippausprosessilla on mahdollista päästä yli 90 % talteenottoasteeseen syöttestä, joten talteenottoaste jätevedenpuhdistamolle tulevasta tyypistä on suuruusluokkaa enintään 10 %.

Ilmastrippauksen ensimmäisessä vaiheessa ammoniumtyppi muuttuu emäksisissä olosuhteissa ammoniakkimuotoon ja siirretään stripperissä ilma- tai höyryvirtaan. Toisessa vaiheessa ammoniakkipitoinen ilma tai höyry puhalletaan pesuriyksikköön happamiin olosuhteisiin, jossa ammoniikki siirtyy pesuliukseen. Prosessi on lämpötila- ja pH-riippuvainen. Ilmastrippauksen toiminta on kuvattu kuvassa 8. Höyrystrippaus perustuu samaan toimintaperiaatteeseen, mutta siinä käytetään ilman sijasta höyryä. Höyryn muodostaminen vaatii korkeamman operointilämpötilan ja -paineen verrattuna ilmastrippaukseen.



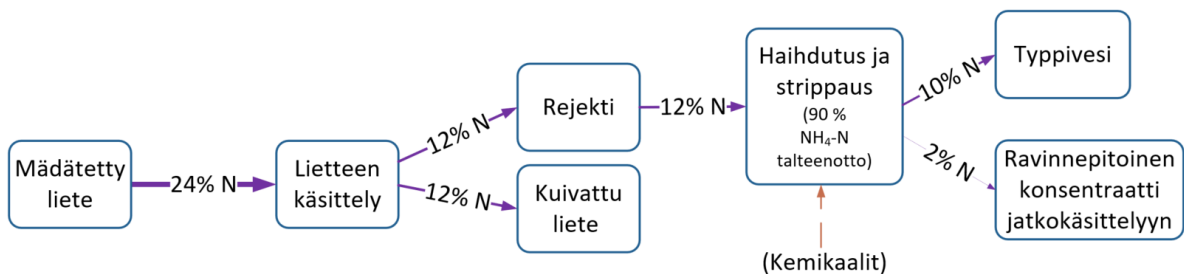
Kuva 8. Ilmastrippauksen toimintaperiaate (muokattu, Malovanyy 2022).

Gasum Oy:n Turun Topinojan biokaasulaitoksella on käytössä haihdutuksen ja höyrystrippauksen yhdistelmä mädätteen kuivauksen rejektivedestä, jonka lopputuotteena on ammoniakkivesi/ typpivesi. Haihdutus tapahtuu alipaineella, ja kondensoituneesta typpipitoisesta nestejakeesta otetaan talteen typpi höyrystrippauksella. Ammoniakkiveden sijaan typpi on mahdollista ottaa talteen myös ammoniumsulfaattina tai ammoniumnitraattina. Haihdutuksessa sivuvirtana muodostuvaa konsentraattia ei voida hyödyntää maataloudessa sellaisenaan, mutta sitä voidaan levittää pelloille esimerkiksi lantaan sekoitettuna. Strippauskolonnin lauhdevesi voidaan hyödyntää osittain biokaasulaitoksella ja loput johdetaan jätevedenpuhdistamolle. Periaate on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Turun biokaasulaitoksella olevan haihdutuksen ja strippauksen yhdistelmän periaate (Kinnunen 2019)

Kuvassa 10 on esitetty typen massatase Turun biokaasulaitoksen tyypiselle haihdutus- ja strippausyhdistelmälle mädätetyn lietteen rejktivestä, joka sisältää noin 12 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta typestä. Kuivattu liete sisältää myös noin 12 % typpeä. Rejktiveden ammoniumtypestä saadaan, josta haihdutus- ja strippausyhdistelmällä talteen 80-90 %. Näin ollen noin 10 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta typestä saadaan talteen esimerkiksi typpivetenä ja noin 2 % typestä päätyy haihdutuksen typpipitoiseen lietekonsentraattiin.



Kuva 10. Strippauksen typen talteenoton massatase Turun biokaasulaitoksen tyypiselle haihdutus- ja strippausyhdistelmälle.

Turussa tuotetun ammoniakkivesi-lopputuotteen laadussa on vaihtelua ja se sisältää jonkin verran epäpuhtauksia, eikä se ominaisuuksiensa puolesta sovellu suoraan lannoitekäyttöön. Ammoniakkivesi on syövyttävää, joten se ei sovellu käytössä oleville levityslaitteistoille. Ammoniakki haihtuu vedestä ja se tulisi annostella tarkasti maaperään parhaimman lannoitevaikutuksen saavuttamiseksi sekä ammoniakkihäviöiden minimoimiseksi. Ammoniakkivesi hyödynnetään tällä hetkellä savukaasupesureissa ja sitä on mahdollista hyödyntää myös metsäteollisuudessa.

Gasum Oy:n Riihimäen biokaasulaitoksella on kokeiltu ilmastrippausprosessia. Prosessissa oli haasteita muun muassa kolonniin kennojen saostumisesta johtuen, eikä ilmastrippausprosessi ole nykyisellään käytössä. Envor Oy:n Forssan biokaasulaitoksella on käytössä höyrystrippausprosessi.

Täyden mittakaavan ilmastrippausprosessi on ollut käytössä VEAS:in laitoksella Oslolla vuodesta 1996 lähtien. Prosessissa käytetään ammoniakkin sitomiseen typpihappoa ja lopputuotteena saadaan ammoniumnitraattiliuosta, jonka pitoisuus on noin 55 % NH_4NO_3 ja pH-arvo on 5-7 välillä. VEAS:in prosessissa annostellaan kalsiumhydroksidia mädätteeseen ennen kuivausta, jolloin saavutetaan hyvä kuivausteho ja päästään alhaisiin rejektiveden kiintoainepitoisuuksiin. Näin ollen vähennetään myös strippauskolonnin tukkeutumiskäskyä. Kalsiumhydroksidin annostelu nostaa rejektiveden pH-arvon korkeaksi (11,5) ja prosessissa ei tarvitse annostella lipeää. Strippauskolonniin muodostuu karbonaattisaostumia, joiden liuottamiseksi on tehtävä suolahappopesuja. Laitos tekee yhteistyötä Yaran kanssa ja Yara hyödyntää ammoniumnitraattiliuoksen tuotannossaan. Strippausprosessilla saadaan talteen syötteenä käytettävästä rejektiveden tyyppistä noin 92 %, joka vastaa noin 13-14 % typen talteenottoa puhdistamolle tulevasta tyyppistä (Malovanyy ym. 2022).

Ruotsissa Ellingenin jätevedenpuhdistamolla oli käytössä täyden mittakaavan ilmastrippausprosessi vuosina 1992-2006. Prosessi otettiin pois käytöstä kemikaalien suuresta kulutuksesta ja prosessin operointi-intensiivisyydestä johtuen.

Myös ruotsalaisen EkoBalans-yrityksen kehittämää ammoniakkiprosessia perustuvaa eco:N-prosessia on testattu ja optimoitu Sjöstadverketissä, Tukholmassa sekä viimeisimmäksi Helsinborgissa RecoLabissa. Prosessi poikkeaa perinteisestä strippausprosessista siten, että siinä käytetään vahvempaa rikkihappoa. Tämän seurauksena ammoniakki-sulfaatti ylikyllästyy sorptioliuoksessa saostuen suolakiteiksi, jotka voidaan poistaa vedestä ja käyttää maataloudessa perinteisenä mineraalilannoitteena olemassa olevilla levityslaitteistoilla. Tuotteen typpipitoisuus on myös korkeampi (21 %), mikä vähentää kuljetuskustannuksia. Sjöstadverketissä saadut tulokset ovat olleet lupaavia (Andersson 2021), mutta RecoLabin pilotoinnista ei ole toistaiseksi vielä saatavilla tuloksia käynnistysongelmista johtuen.

Ammoniakin strippaus voidaan toteuttaa myös ilman kemikaaleja, jolloin prosessia ohjataan lämpötilan mukaan. Kyseistä prosessia ovat kehittäneet esimerkiksi GNS (ANASTrip) nykyisin Systemic (FiberPlus), Colsen (AMFER) ja Organics. Termistä ammoniakkin strippausprosessia ei ole vielä toistaiseksi ollut käytössä täydessä mittakaavassa jätevesilietteitä käsittelevillä laitoksilla. Menetelmää on kuitenkin testattu pilot-mittakaavassa.

Strippauksen etuna on sen suhteellisen kompakti koko ja hyvä erotustehokkuus. Haasteina voi esiintyä esimerkiksi laitteiston likaantumista ja tukkeutumista sekä nesteiden vaahtoamista. Prosessissa kuluu energiaa pumppaukseen ja mahdolliseen lämmitykseen. Kuluja muodostuu lisäksi kemikaaleista. Ammoniakin strippauksen kokonaiskulut ovat riippuvaisia käsiteltävän nestejakeen ammoniakkipitoisuudesta (Christian ym. 2016). Strippauksen lopputuotteen haitta-aineita ja lääkkeitä on analysoitu muun muassa Kiertötyppi-hankkeessa. Tulosten perusteella ainoastaan PAH-yhdisteitä havaittiin pilotoinneissa tuotetuissa typpivedessä, tosin alhaisissa pitoisuuksissa.

8.2.3 Kalvomenetelmät

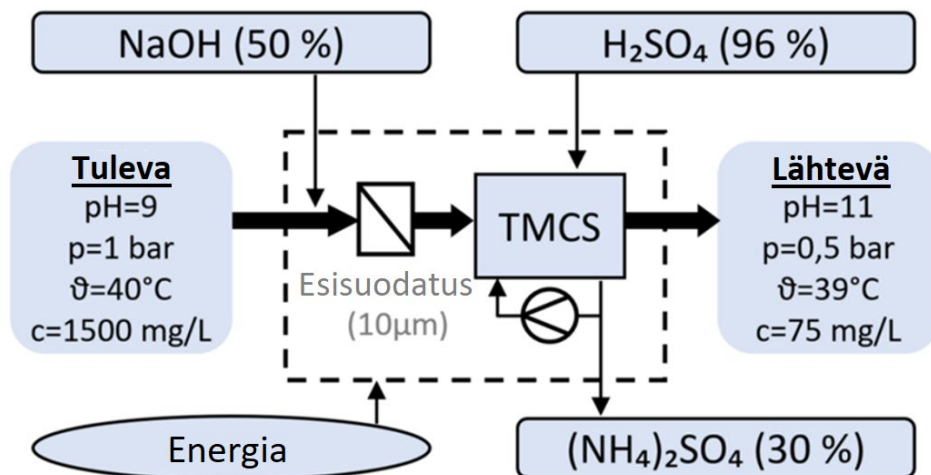
Ravinteita voidaan ottaa talteen jäteveden ja jätevesilietteen nestejakeista kalvomenetelmillä. Kalvoihin perustuvat talteenottomenetelmät ovat pitkälti vielä kehitysvaiheessa ja lupaavimpia prosesseja ovat elektrodialyyssi, suoraosmoosi (FO) sekä kaasunerotus (kaasua läpäisevät hydrofobiset kalvot) höyrygradientin (tislaus) tai konsentraatiogradientin avulla. On huomattava, että kahden tai useamman kalvoprosessin yhdistelmällä prosessit voivat täydentää toisiaan ja maksimoida siten ravinteiden talteenoton kokonaistehokkuutta (hybridikalvoprosessit). Edellä mainittujen prosessien lisäksi myös käänteisosmoosi (RO) ja nanosuodatus (NF) ovat potentiaalisia menetelmiä ravinteiden talteenottoon, mutta nämä prosessit ovat kuitenkin alttiimpia kalvojen likaantumisongelmille. Kalvoprosessit vaativatkin esikäsittelyprosessin, sillä liiallinen suspendoituneen aineksen määrä johtaa pinnoitteiden ja kalvojen tukkeutumiseen.

Kalvomenetelmistä pilot- ja täydessä mittakaavassa on testattu hydrofobisia kaasua läpäiseviä kalvoja, joihin myös Suomessa kehitetty NPHarvest-menetelmä perustuu. Menetelmästä kerrotaan tarkemmin seuraavassa luvussa.

Saksassa Wuppertalissa Kohlfurthin jätevedenpuhdistamolla on toiminnassa TMCS-erotusmenetelmää (TransMembraneChemisorption) hyödyntävä täyden mittakaavan laitos, jossa on käytössä Liqui-Cel®-kalvolaitteisto. Liqui-Cel®-kalvolaitteistoa kutsutaan myös nimellä hollow fiber liquid membran contactor (HF-LLMC) ja siinä käytetään hydrofobisia onttokuitupohjaisia kontaktikalvomoduuleja. Wuppertalin kalvolaitteisto on suunniteltu typen poistamiseen teollisuuden jätevesistä eikä varsinaisesti yhdyskuntajätevesien typtalteenottoon (Wupperverband).

Saksalaisella jätevedenpuhdistamolla Münsterissä on pilotoitu täydessä mittakaavassa rejektiviesien käsittelyä Liqui-Cel®-kalvolaitteistolla. Ennen varsinaista kalvovaihetta rejektiveteen lisättiin lipeää nostamaan pH-arvoa, jonka myötä muodostunut kiintoaine ja saostumat poistettiin lamellierottimella sekä kolmivaiheisella suodatuksella. Kalvolaitteisto koostuu yhteensä 16 onttokuituisesta kalvovyksiköstä, jotka on asennettu kolmeen käsittelylinjaan ja jokaisessa linjassa on kolme osastoa. Käytetyn kalvolaitteiston maksimaalinen käsittelykapasiteetti on 30 m³/h ja kalvojen yhteispinta-ala on 3 520 m².

Kalvolaitteistossa käytetään rikkihappoa ja lopputuotteena saadaan ammoniumsulfaattiliuosta (Kuva 11). Kierrättämällä rikkihappoa laitteistossa saadaan lopputuotteeseen korkeampi ammoniumpitoisuus. Täyden mittakaavan testeissä käytettiin kolmasosaa laitteiston kapasiteetista, jolla saavutettu keskimääräinen typen talteenottoaste syötteestä (rejektiviesi) oli 85 % ja lopputuotteen typen osuus oli noin 3,5 p-%. Tulevissa testeissä pyritään optimoimaan prosessi niin, että lopputuotteeseen saadaan korkeampi typpipitoisuus, jotta se olisi suoraan soveltuva Saksan lannoitemarkkinoille (lainsäädännön raja-arvo 5,0 ± 0,5 %).

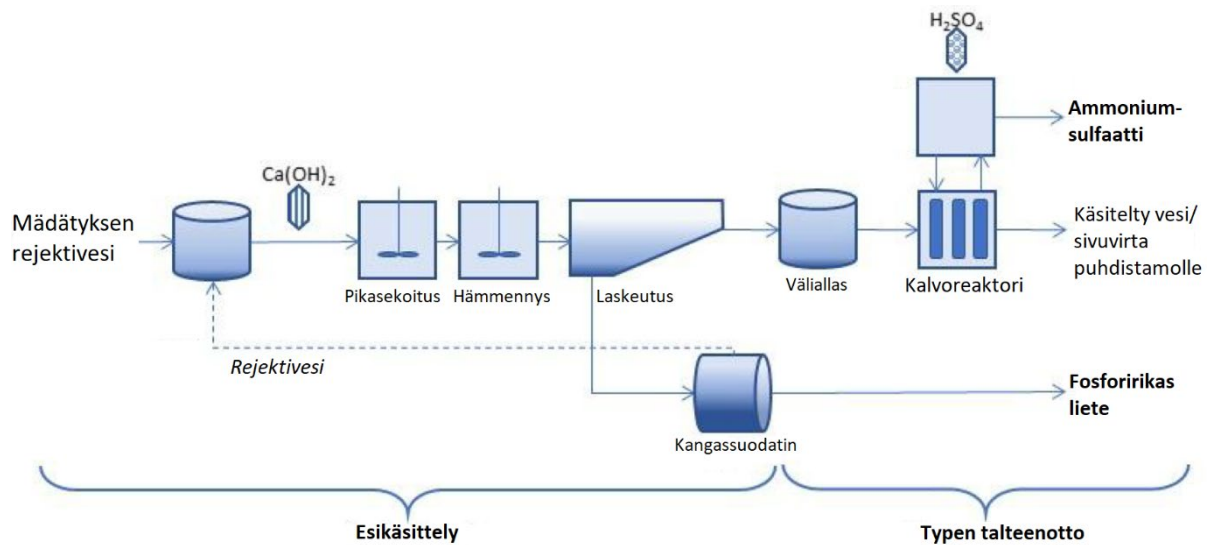


Kuva 11. TMCS-kalvojen toimintaperiaate (Malovanyy 2022).

Suora osmoosi on myös lupaava ravinteiden talteenottomenetelmä. Sitä on toistaisesti testattu vain laboratoriomittakaavassa erilliskerätylle virtsalle (Ray ym. 2020, Volpin ym. 2019). Suora osmoosi perustuu veden ja siihen liuenneiden aineiden erottamiseen luonnollisen osmoottisen paineen ja puoliläpäisevän kalvon avulla. Ravinnerikkaaseen jakeeseen päätyy kuitenkin haitta-aineita, raskasmetalleja ja muita epäpuhtauksia.

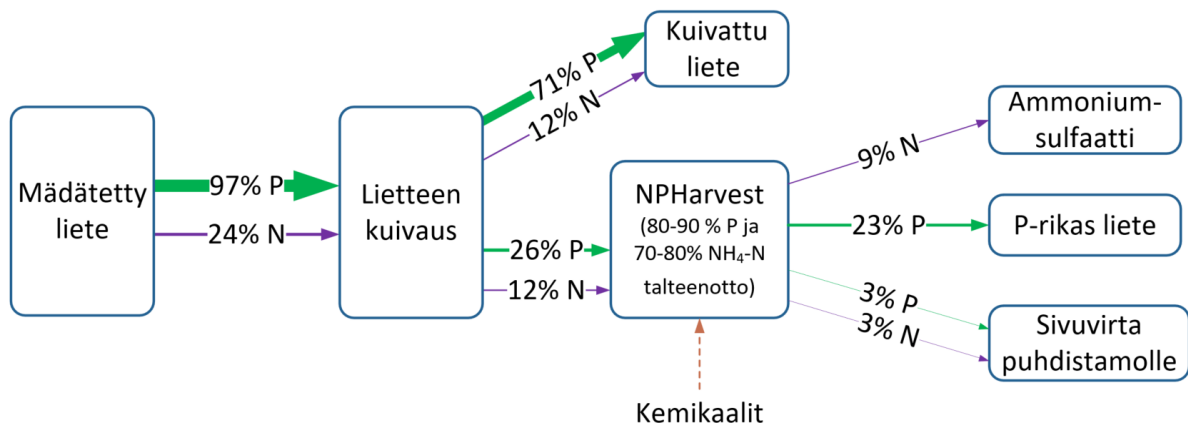
8.2.4 NPHarvest

NPHarvest on Suomessa Aalto-yliopistossa kehitetty ravinteiden talteenottomenetelmä, jossa ammoniumtyppi otetaan nestejakeesta (esimerkiksi mädättämön rejektivedestä) puoliläpäisevällä hydrofobisella kalvolla ja fosfori saostetaan kalsiumkarbonaatilla tai kalsiumhydroksidilla. Menetelmässä nestejakeen ammoniumtyppi muutetaan ammoniakiksi nostamalla pH-arvoa kalsiumkarbonaatin avulla ja muodostunut ammoniakki erotetaan kaasuja läpäisevällä kalvolla, minkä jälkeen se saostetaan ammoniumsulfaatiksi kierrättämällä rikkihappoa ammoniakkiliuoksessa. Nostettaessa pH-arvoa kalsiumkarbonaatilla fosfori ja kalvoille haitallinen kiintoaine saostuvat fosforisakaksi. NPHarvest-menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. NPHarvest-menetelmän toimintaperiaate (Kaljunen 2022).

Syötteen sisältämästä ammoniumtypestä on mahdollista saada talteen noin 70-80 % ja fosforista jopa yli 90 %, jos puhdistamolla on käytössä biologinen fosforinpoisto (Kaljunen 2022). Kuvassa 13 esitetyn massataseen mukaan NPHarvest-menetelmällä talteen saatavan typen osuus on noin 9 % puhdistamolle tulevasta typestä ja fosforin osuus noin 23 %, mikäli puhdistamolla on käytössä biologisen ja kemiallisen fosforinpoiston yhdistelmä (kts. kuva 3). Pelkän kemiallisen fosforinpoiston jätevedenpuhdistamoilla liukoisien fosforin pitoisuus rejektivedessä on hyvin alhainen, joten fosforin talteenottoa tästä virrasta ei nähdä taloudellisesti kannattavana. Fosforipitoisen lopputuotteen kehitys on vielä kesken.



Kuva 13. NPHarvest massatase, kun puhdistamolla on biologinen fosforinpoisto.

NPHarvestin toimintaa on pilotoitu Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla mädättämön rejektivedellä ja viimeisimmäksi erilliskerätyillä mustilla jätevesillä RecoLabin tiloissa Helsingborgissa, Ruotsissa (Aalto 2021). Lisäksi pilotointeja on tehty Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikan suotovesillä.

Lopputuotteena saatava ammoniumsuola on liuos, jonka ammoniumsulfaattipitoisuus on 2-3 % (n. 25 g/l). Liuos voidaan myös kiteyttää, molemmat lopputuotteen olomuodot on esitetty kuvassa 14. Vaihtoehtoisia lopputuotteita ovat ammoniumfosfaatti ja -nitraatti. Fosforisakan fosforipitoisuus on 1-3 % ja se sisältää 10 % hiiltä sekä 8 % kalsiumia (Aalto 2022), lopputuotteen olomuoto on esitetty kuvassa 15. Lopputuotteiden sisältämistä raskasmetalleista, orgaanisista haitta-aineista ja mikromuoveista ei ole vielä toistaiseksi saatavilla paljon tutkimustuloksia. Viikinmäen puhdistamolla tehtyjen pilotointien lopputuotteena saadun ammoniumsulfaatin raskasmetallipitoisuudet ovat olleet selvästi alle lainsäädännön raja-arvojen. Lääkeainejäämät ovat olleet pääasiassa alle määrittämissä ja havaittujen aineiden pitoisuudet alhaisia. PAH16-yhdisteistä ainoastaan fenantreeni on ollut yli laboratorion määrittämissä. (Kaljunen ym. 2021)



Kuva 14. Ammoniumsulfaattiliuos ja kiteytetty NPHarvest-lopputuote. (Kaljunen 2022)



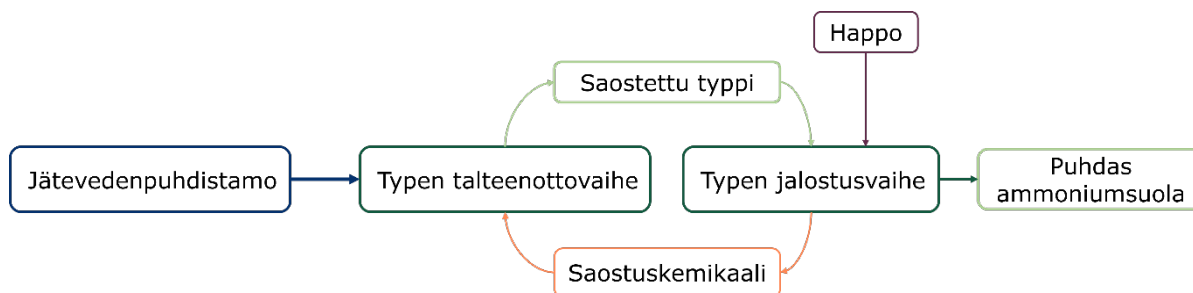
Kuva 15. Fosforipitoinen NPHarvest-lopputuote. (Kaljunen 2022)

Merkittävä NPHarvest-menetelmän investointikustannus ovat kaasua läpäisevät kalvot. Kalvojen käyttöiän on arvioitu olevan noin viisi vuotta, joten niiden uusimisesta aiheutuu käyttökuluja. Kalvot vaativat huuhtelua laimealla hapolla tukkeutumisen estämiseksi. Moniin muihin kalvomenetelmiin verrattuna NPHarvestin energiankulutus on alhaisempi, sillä erotus tapahtuu normaalissa paineessa. Energiaa kuluu pääasiassa vain jakeiden pumppaukseen ja sekoittamiseen.

NPHarvestia on tähän asti kehitetty yliopistossa ja tällä hetkellä siitä on suunnitteilla kaupallinen versio kahden 40 jalan (12,2 m) merikontin ratkaisuna, jonka käsittelykapasiteetti on noin 100 m³/d. Kaupallisella versiolla on tarkoituksena saavuttaa korkeampi ammoniumtyypen talteenottotehokkuus, jopa yli 90 % syötteestä (rejktivesi).

8.2.5 Aqua2N

Aqua2N-menetelmä on ruotsalaisen EasyMining:in kehittämä typen talteenottomenetelmä nestejakeille, kuten rejktivedelle. Prosessissa ammoniumtyppi otetaan talteen saostuskemikaalilla (magnesiumfosfaatti) ja erotetaan rejktivedestä. Toisessa vaiheessa talteen otettu ammoniumtyppi saostetaan lannoitteeksi, ammoniumsulfaatiksi, rikkihapon avulla, ja samalla saostuskemikaali saadaan erotettua uudelleenkäyttöä varten. Syötteen tyypestä saadaan erotettua yli 95 %. Lopputuotteena saatava ammoniumsulfaatti voidaan hyödyntää lannoitteena sellaisenaan tai sekoitettuna muihin yhdisteisiin. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 16 ja lopputuotteen olomuoto kuvassa 17.



Kuva 16. Aqua2N-menetelmän prosessikuvaus (LIFE RE-Fertilize 2023).

Aqua2N-prosessin pilot-laitos on ollut käytössä Tanskassa Kööpenhaminan Lynetten jätevedenpuhdistamolla. Pilot-laitoksen käsittelykapasiteetti oli 4 m³/h. Pilotoinneissa tuotettua lopputuotetta on toimitettu paikallisille viljelijöille. Vastaavalla pilot-laitoksella demonstroitiiin typen talteenottoa suotovesistä Högybytorpin jätteenkäsittelylaitoksella Tukholman ulkopuolella Ruotsissa. Suotovesien tyyppipitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin jätevesiprosessin rejktiveden. Suotovedestä talteen otettavaa typpeä ei voida käyttää suoraan lannoitteena EU-lainsäädännöllisistä syistä.



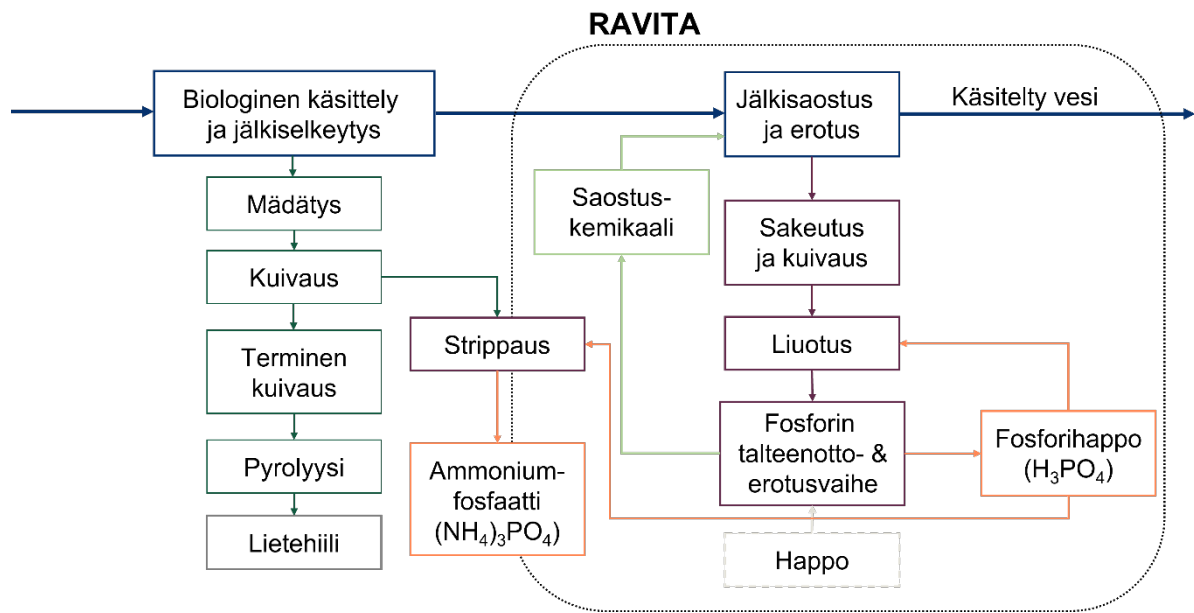
Kuva 17. Aqua2N lopputuote. (LIFE RE-Fertilize 2023)

Aqua2N-menetelmästä ei valitettavasti saatu lisätietoja tai tietoja investointi- tai operointikustannuksista yhteydenotoista huolimatta. Tästä johtuen menetelmää ei voida tarkastella taloudellista näkökulmasta tämän selvityksen myöhemmissä vaiheissa.

8.2.6 RAVITA™

RAVITA™-prosessi on HSY:n (Helsingin seudun ympäristöpalvelut) kehittämä fosforin talteenottomenetelmä. Sen kehittämisen lähtökohtana on ollut Suomen jätevedenpuhdistamoilla yleisesti käytössä olevan kemiallisen fosforin saostuksen kanssa yhteensopiva fosforin talteenottomenetelmä. Osana RAVITA-prosessin kehittämistä on ollut myös saavuttaa tiukat fosforin poiston raja-arvot jätevedenpuhdistamoilla. RAVITA-prosessi on patentoitu EU:ssa ja USA:ssa.

RAVITA-prosessissa fosfori otetaan talteen puhdistamon loppupäässä jälkikäsittelyvaiheessa, jossa fosfori saostetaan kemiallisesti jätevedestä. Syntyvä kemiallinen liete erotetaan esimerkiksi kiekkosuodatuksella ja se kuivataan esimerkiksi lingoilla noin 15 % kuiva-ainepitoisuuteen. Lietteestä fosfori liuotetaan/uutetaan fosforihapolla. Osa lopputuotteena muodostuvasta fosforihaposta kierrätetään takaisin prosessiin ja osa voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitetuotannossa tai teollisuusprosesseissa. Prosessissa saadaan rikkihapon avulla talteen myös osa käytetystä saostuskemikaalista. RAVITA-prosessi voidaan yhdistää typen talteenoton osalta myös strippausprosessiin. Tällöin prosessissa saatavaa fosforihappoa voidaan hyödyntää strippausprosessissa ja lopputuotteena saadaan ammoniumfosfaattia, jota voidaan hyödyntää suoraan lannoitteena. RAVITA-prosessin periaate yhdistettynä strippaukseen ja pyrolyysiin on esitetty kuvassa 18.

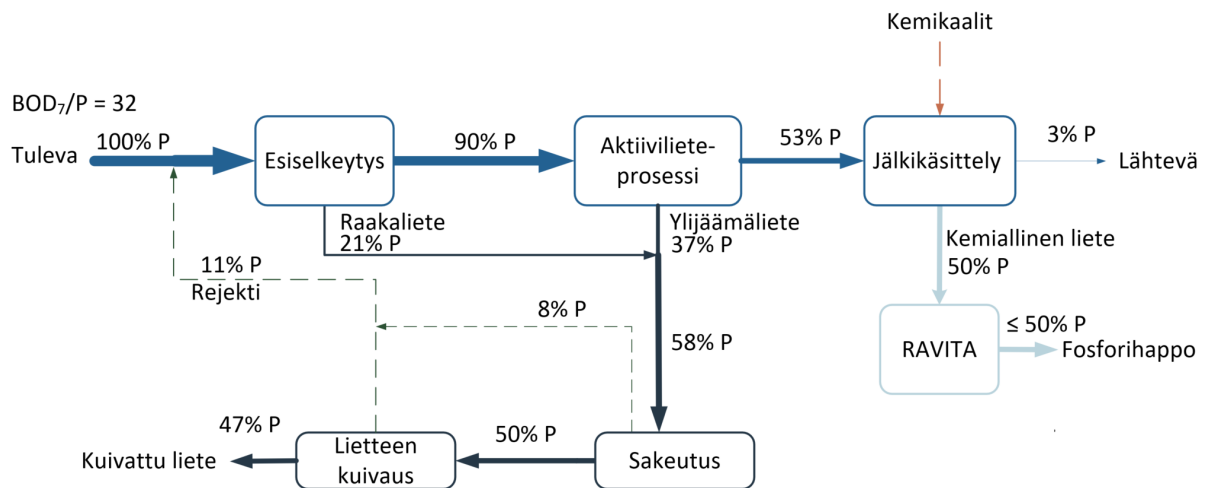


Kuva 18. RAVITA-prosessin toimintaperiaate (Valtari 2022).

Viikinmäen jätevedenpuhdistamolla RAVITA DEMO -pilot-laitteisto (AVL 1 000) on ollut käytössä vuodesta 2020 lähtien, ja vuosien 2021-2022 aikana toteutetussa RAHI-hankkeessa on keskitytty RAVITA-prosessin toteuttamiseen aiempaa suuremmassa mittakaavassa (HSY 2022). RAHI-hankkeessa skaalattiin prosessin liuotus- ja uuttovaiheet täyden mittakaavan koelaitosta varten. Kyseinen hanke toteutettiin HSY:n, Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:n ja Porvoon veden yhteistyönä. Osana RAHI-hanketta pilotoitiin myös pyrolyysiprosessia jalostamaan aktiivilietevaiheen biologisen ylijäämälietteen hiili stabiiliin muotoon. Pyrolyysin lopputuotteena muodostunutta liettehiiltä voidaan hyödyntää esimerkiksi biojätteen mädätysprosessissa ja lannoitteena. Pyrolyysia koskeva osahanke toteutettiin HSY:n ja Hämeen ammattikorkeakoulu HAMK:n yhteistyönä.

RAVITA-prosessin, ravinteiden talteenoton ja hiilen sidonnan kehitystyö tulee jatkumaan vuonna 2023 alkavassa RAHI 2 -jatkohankkeessa (HSY 2022). Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa selvitetään fosforin talteenoton valtakunnallista potentiaalia ja toisessa vaiheessa jatkokehitetään fosforin talteenottoa tähän mennessä saatujen tulosten perusteella (HSY).

Jotta RAVITA-prosessilla voidaan saavuttaa maksimaalinen fosforin talteenotto, tulee jätevedenpuhdistamolla jättää pois kemiallinen saostus esi- ja rinnakkaissaostusvaiheesta puhdistamolla. Puhdistamolle tulevasta fosforista lietteeseen sitoutuu esiselkeytyksessä noin 20 % ja biologisessa prosessissa yli 30 %. Pilot-laitoksen tuloksien mukaan jälkisaostuksella ja kiekkosuodatuksella on voitu poistaa lähes 95 % syötteen fosforista. Jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista on mahdollista saada talteen noin 50 %. Kuvassa 19 on esitetty fosforin massatase jätevedenpuhdistamolle, jolla esi- ja rinnakkaissaostus on jätetty pois ja fosfori otetaan talteen jälkikäsittelyn kemiallisesta lietteestä RAVITA-prosessilla.



Kuva 19. RAVITA™, fosforin massatase.

Käytetystä saostuskemikaalista on pilotoinneissa saatu talteen noin 70 %. Parhaimmat tulokset on saavutettu, kun saostuskemikaalina on käytetty alumiinisulfaattia. Kierrätettävä saostuskemikaali laimenee prosessissa, joten se ei täysin poista ulkoisen saostuskemikaalin annostelun tarvetta. Saostuskemikaalin kierrättämisen kehittäminen ja optimointi on vielä kesken.

Täyden mittakaavan laitoksella kemiallisen saostuksen on oltava kaksivaiheinen, jotta voidaan taata riittävän alhaiset fosforipitoisuudet lähtevässä jätevedessä. Verrattuna rinnakaissaostuksella tuotetun lietteen raskasmetallipitoisuuksiin sekä lannoitelainsäädännön (24/2011) määrittämiin raja-arvoihin, on RAVITA-prosessin kemiallisen lietteen raskasmetallipitoisuuksien todettu olevan erittäin alhaisia (HSY). Pieniä pitoisuuksia orgaanisia haitta-aineita havaittiin kemiallisessa lietteessä. Lopputuotteena saatava laimea fosforihappo ei sisällä mikromuoveja. Kuvassa 20 on esitetty RAVITA-prosessissa käytettävä kemiallinen liete, erotettu fosfaattiliuos ja lopputuotteena saatava fosforihappo.



Kuva 20. RAVITA™ prosessissa käytettävä kemiallinen liete, erotettu fosfaattiliuos ja lopputuote, fosforihappo. (Baltic Smart Water Hub 2020)

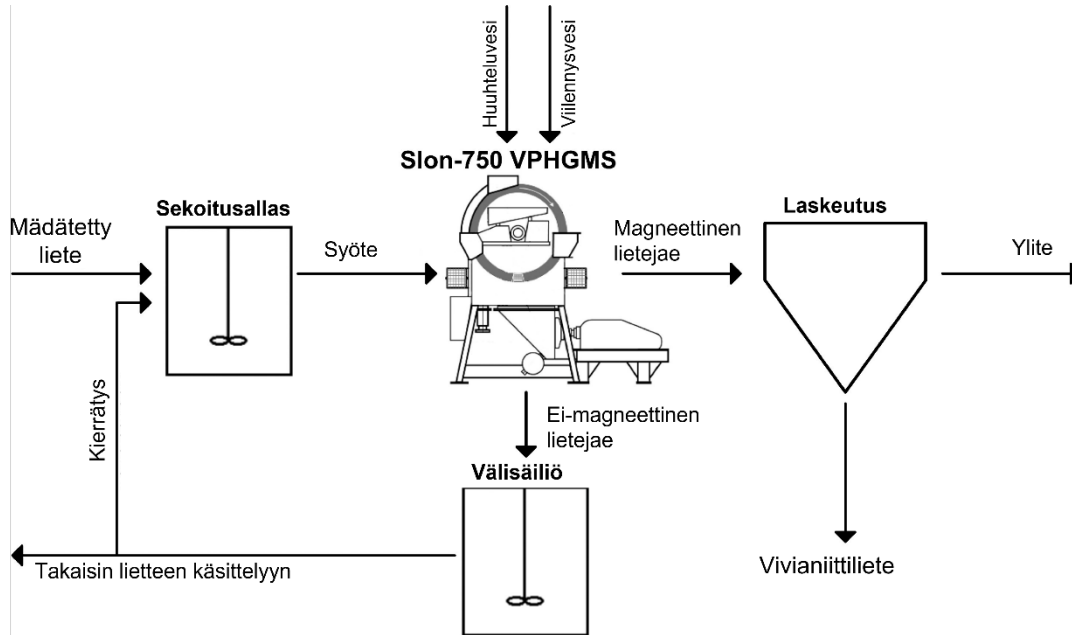
HSY:n tämänhetkisen näkemyksen mukaan keskitetty fosforin talteenotto RAVITA-prosessilla olisi todennäköisesti kannattavin vaihtoehto. RAHI 2 -hankkeessa tullaan arvioimaan keskitettyjä ratkaisuja, joissa jälkisaostettu fosforisakka kerätään pienemmiltä puhdistamoilta ja RAVITA-prosessin erotus- ja liuotusvaiheet toteutetaan keskitetysti suuremmissa yksiköissä. RAVITA-prosessi on kehitysvaiheessa, eikä sitä ole vielä kaupallistettu.

8.2.7 Fosforin talteenotto vivianiittina

Kemiallisesti raudalla saostetusta fosforista on mädätejäännöksessä tutkimuksien mukaan 80-90 % vivianiittimuodossa ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$) (Wilfert ym. 2018). Vivianiittifosforia on havaittu muodostuvan myös säilöittäessä sakeutettua lietettä riittävällä viipymällä hapettomissa olosuhteissa (Prot ym. 2022). Vivianiitin ei-toivottu muodostuminen voi aiheuttaa putkien tukkeutumista ja näin ollen lisätä huollon tarvetta (Prot ym. 2021).

Vivianiitti on paramagneettinen yhdiste, joka voidaan erottaa jätevesilietteestä magneettisilla menetelmillä, kuten Kemiran patentoimalla ViviMag-tekniikalla (Grönfors ym.). Vivianiitin talteenottoa jätevesilietteistä on tutkittu myös erilaisilla saostus-/kristallisoitimenetelmillä (Priambodo ym. 2017, Li & Sheng 2021). Vivianiittia voidaan käyttää rautalannoitteena kalkkipitoisella maaperällä kasvavien viljelykasvien kuten mansikoiden, oliivipuiden, lupiinien, kiivien, viiniköynnösten, persikkapuiden ja sitruspuiden rautakloroosin ehkäisemiseksi (Caballero ym. 2009, Santiago ym. 2013, Santiago ym. 2010, Domenico ym. 2003, Eynard ym. 1992, Rosado ym. 2002). Vivianiitista voidaan erottaa emäksisen käsittelyn avulla nestemäistä fosfaattilannoitetta ja rautaoksidisaostumaa (Prot ym. 2019). Muodostunut rautapitoinen jae voitaisiin mahdollisesti hyödyntää raaka-aineena rautasuolojen tuotannossa ja näin ollen edelleen saostuskemikaalina jätevedenpuhdistamoilla. Vivianiittia voitaisiin käyttää myös syötteenä jätevesilietetuhkan fosforin talteenottoyksiköissä. Verrattuna tuhkaan vivianiitin fosforipitoisuus on kuivamassaa kohden korkeampi ja näin ollen se voisi parantaa lopputuotteen fosforipitoisuutta (Grönfors ym.). Muita mahdollisia käyttökohteita vivianiitille ovat litium-rauta-fosfaattiakut (LFP) (Grönfors ym.) ja mineraaliset pigmentit (Figueiredo ym. 2010).

Fosforin talteenottomenetelmä ViviMag on vivianiitin erotukseen perustuva teknologia, jonka Kemira on patentoinut. Teknologian ovat kehittänyt eurooppalainen kestävä vesiteknologian osaamiskeskus Wetsus ja Delftin teknillinen yliopisto yhteistyössä Kemiran, useiden muiden yksityisten yritysten ja kunnallisten vesilaitosten kanssa (Kemira, 2022). ViviMag:in erotustekniikka perustuu kaivosteollisuudessa yleisesti käytettyyn Vertically Pulsating High Gradient Magnetic Separator (VPHGMS) tekniikkaan (Wijdeveld, 2022). Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 21.

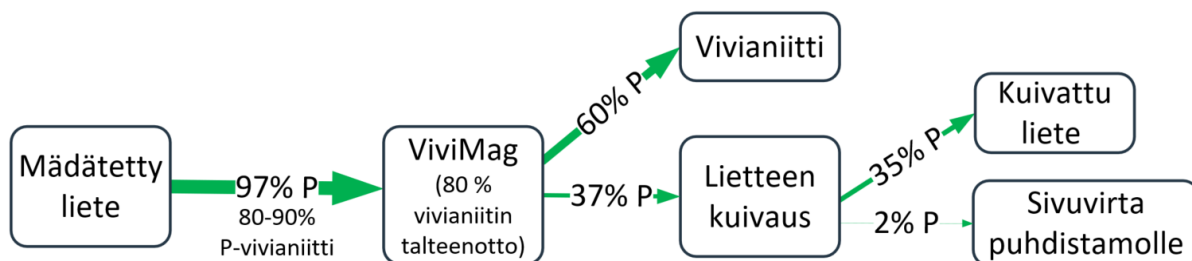


Kuva 21. ViviMag-menetelmän prosessikaavio (Wijdeveld, 2022).

Teknologiaa on kehitetty ja tutkittu laboratoriomittakaavassa (Prot ym., 2020). Ensimmäiset pilot-kokeet tehtiin onnistuneesti hollantilaisella Nieuwveerin jätevedenpuhdistamolla vuonna 2019. Kyseisellä puhdistamolla on käytössä kemiallinen fosforinpoisto. Kapasiteetiltaan 1,0 m³/h pilotlaitteisto onnistui ottamaan talteen vivianiittia 80 % syötteestä, joka vastaa 60 % talteenottoastetta jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista (Wijdeveld, 2022).

Toinen täyden mittakaavan jatkuvatoiminen pilot-laitos on otettu käyttöön heinäkuussa 2022 saksalaisella Schönebeckin jätevedenpuhdistamolla Kemiran ja Veolian yhteistyönä. Pilot-laitteisto on sijoitettu 40 jalan (12,2 m) merikonttiin ja sen kapasiteetti on 1 m³/h liettä, joka vastaa 10 000 AVL laitosta (Korving & Hansen, 2022). Schönebeckin jätevedenpuhdistamolla on biologinen fosforinpoisto. Ennen pilotointeja ylijäämälietteeseen syötettiin saostuskemikaalia, jotta vivianiittia saatiin muodostumaan. Pilotkokeissa saavutettiin yli 80 % talteenottoaste käytetyn syötteen vivianiittimuodossa olevasta fosforista, mikä vahvistaa aikaisempia tuloksia (Grönfors ym.).

Kuvassa 22 on esitetty fosforin massatase mädätetylle lietteelle jätevedenpuhdistamolla, jolla on käytössä kemiallinen fosforin saostus. Mädätetyssä lietteessä on noin 97 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista, josta 80-90 % on vivianiittimuodossa. ViviMag-prosessilla voidaan ottaa talteen jopa 80 % vivianiittista, joten talteen saadaan noin 60 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista. Loput fosforista päätyy lietteen mukana kuivaukseen.



Kuva 22. ViviMag, fosforin massatase.

Nieuwveerin jätevedenpuhdistamolla tehtyjen pilot-kokeiden lopputuotteesta analysoitiin raskasmetallipitoisuudet ja niiden todettiin olevan alhaisia (Wijdeveld ym. 2022). Orgaanisia haitta-aineita tai mikromuoveja ei ole analysoitu lopputuotteesta. Schönebeckin pilot-laitteistolla talteen otetun vivianiitin laatua tutkittiin ja raskasmetallit olivat selvästi alle EU:n lannoitelainsäädännön rajojen (Grönfors ym.).

Talteen saatavan vivianiittilietteen (Kuva 23 vasemmalla) kuiva-ainepitoisuus on noin 20-25 % TS. Jatkokäsittelmällä sitä esimerkiksi flotaatiolla tai hydro syklonilla saadaan parannettua lopputuotteen laatua ja pienennettyä sen tilavuutta.



Kuva 23. Vivimag lopputuote. Vasemmalla vivianiittiliete (Veolia Deutschland 2023), oikealla mikroskopointikuva vivianiittilietteestä (Kemira 2023).

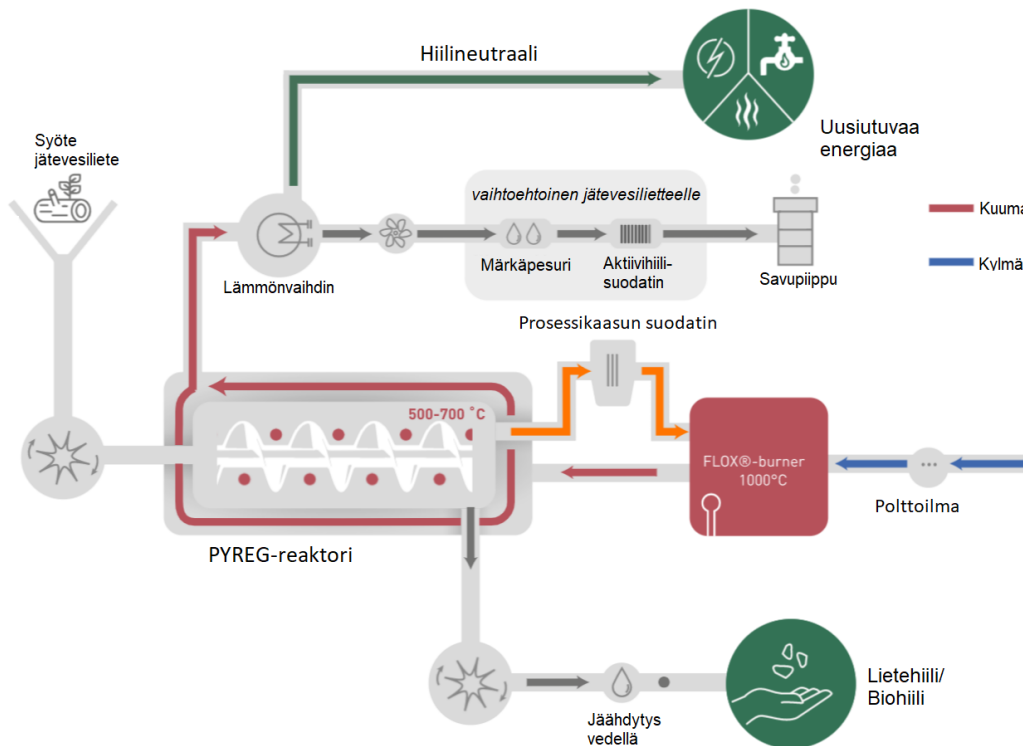
Myös muualle Eurooppaan on suunniteltu asennettavaksi vastaavia pilot-laitoksia (Korving & Hansen 2022, Kemira 2022b). Seuraavat pilotointikokeet on tarkoitus toteuttaa Tanskassa ja Hollannissa vuonna 2023, ja niissä tullaan tutkimaan täydessä mittakaavassa vivianiitin saostusta ilman mädätystä. Tutkimuksien tavoitteena on selvittää vivianiitin talteenotto prosessin potentiaalia myös pienemmillä jätevedenpuhdistamoilla, joilla ei ole mädätystä (Grönfors ym.).

Kemira on tehnyt markkina-analyysia mielenkiinnosta vivianiittia kohtaan. Useita EU:n markkina-alueella toimivia lannoitetta tuottajia on kontaktoitu ja he ovat olleet kiinnostuneita käyttämään vivianiittia tuotteidensa raaka-aineena (Grönfors ym.).

8.2.8 Pyrolyysi

Pyrolyysi on terminen käsittelymenetelmä, jolla voidaan käsitellä myös jätevesilietteitä. Lopputuotteena pyrolyysistä saadaan lietehiiltä, jota voidaan käyttää maanparannusaineena. Vaikka maanparannusaineita tuottavat menetelmät on rajattu tämän selvityksen ulkopuolelle, kuvataan pyrolyysiprosessi tässä yhteydessä, sillä sen nähdään olevan potentiaalinen menetelmä kiertotalouden näkökulmasta. Prosessissa muodostuvaan lietehiileen sitoutuu merkittävästi lietteen sisältämää fosforia ja mahdollisesti myös osa typeistä. Kuvaus keskittyy prosessiin sekä lopputuotteeseen, eikä pyrolyysin taloudellisuutta arvioida tässä kohtaa tarkemmin. Prosessia on kuvattu kattavasti VVY:n 2019 julkaisemassa monistesarjassa nro 56: Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen.

Pyrolyysissä liete käsitellään korkeassa 500-700 °C:een lämpötilassa ja hapen osalta rajoitetuissa olosuhteissa. Pyrolyysiprosessit luokitellaan niissä käytetyn lämpötilan ja viipymän mukaan. Prosessista muodostuu hiilijae (yleisesti biohiili, jätevesilietteitä käsiteltäessä lietehiili) sekä kaasua ja pyrolyysiöljyä. Lietehiilen fosforipitoisuus on 3-6 p-%. Pyrolyysiin syötettävän lietteen kuiva-ainepitoisuuden tulee olla vähintään 80 %, joten se vaatii esikäsittelyä lietteen termisen kuivauksen. Monissa ratkaisussa terminen kuivaus ja pyrolyysi ovat yhdistettyjä prosesseja. Tällöin termiseen kuivaukseen vaadittu lämpöenergia saadaan pyrolyysiprosessista ja tyypillisesti lämpöenergiaa jää yli hyödynnettäväksi muihin tarkoituksiin. Prosessi on täten energiaomavarainen. Lietteen määrä laskee pyrolyysin myötä jopa 90 % verrattuna mekaanisesti kuivattuun lieteeseen, jonka kuiva-ainepitoisuus on noin 25 %.



Kuva 24. Pyrolyysi (PYREG)

European Biochar Industry Consortiumin tammikuun 2023 julkaisussa on koottu tuloksia pyrolyysin vaikutuksista jätevesilietteen haitta-aineisiin. Julkaisussa koottujen tietojen mukaan pyrolyysi tuhoaa jätevesilietteen patogeeneit (prosessilämpötila > 350 °C ja viipymä useita minutteja) ja orgaaniset haitta-aineet (prosessilämpötila > 500 °C ja viipymä > 3 min). Yleisimpien mikromuovien (polyeteeni ja polypropeeni) on havaittu tuhoutuvan kokonaan, kun pyrolyysin lämpötila on vähintään 450 °C. Lietteen sisältämistä PFAS-yhdisteistä saadaan poistettua jopa yli 90 %, kun prosessin lämpötila on 600 °C, viipymä 10 min ja pyrolyysikaasut käsitellään 850 °C lämpötilassa. Lisäksi PAH-yhdisteet voidaan tuhota lähes kokonaan, kun lämpötila on yli 600 °C. Pyrolyysillä saadaan laskettua CO₂-päästöjä verrattuna lietteen levitykseen suoraan pellolle, sillä hiili on stabiilissa muodossa eikä vapaudu ilmakehään kuten lietteen sisältämä hiili. Lietehiili sitoo itseensä hiilidioksidia ja toimii näin ollen hiilinieluna. Väällisesti myös kuljetuksesta muodostuvat päästöt laskevat, kun kuljetettavan lietteen määrä pienenee.

Jätevesilietteestä saatavan lietehiilen fosfori on niukkaliukoisessa muodossa, jos se on valmistettu kemiallisesti saostetusta lietteestä. Näin ollen suomalaisilta jätevedenpuhdistamoilta saatavaa lietehiiltä ei voida EU:n lannoitelainsäädännön mukaan luokitella fosforilannoitteeksi (ESPP 2023). EU-lannoitelainsäädännössä on oma ainesosaluokka (CMC) 14 pyrolyysissa ja kaasutuksessa muodostuville aineille. Yhdyskuntajätevesilietteiden käyttö ei ole kuitenkaan sallittua kyseisessä ainesosaluokassa, joten lietehiiltä ei voida käyttää sen puitteissa maataloudessa. Tanskassa pyrolyysi on tunnustettu jätevesilietteen hygienisointimenetelmäksi vuonna 2022, mikäli pyrolyysiprosessin lämpötila on yli 500 °C ja viipymä vähintään 3 minuuttia. Tanskan kansallinen lainsäädäntö mahdollistaa lietehiilen käytön maataloudessa tietyin ehdoin. Lietehiilen käyttö on sallittua, mikäli syötteenä käytetty liete täyttää paikallisen lainsäädännön (BEK no. 1001, 27/06/2018) raja-arvot raskasmetallien ja orgaanisten haitta-aineiden osalta. Maaliskuussa 2023 lainsäädäntöön tullaan lisäämään raja-arvot myös PFAS-yhdisteille, jotka ovat olleet aikaisemmin ohjearvoja.

Pyrolyysistä on saatavilla kaupallisia ratkaisuja ja erityisesti jätevesilietteen käsittelyyn tarkoitettuja pyrolyysilaitoksia toimittaa esimerkiksi saksalainen yritys PYREG ja tanskalainen AquaGreen. PYREG on toimittanut laitoksia Euroopassa muun muassa Saksaan, Tšekkeihin ja Ruotsiin. Tanskassa Odsherredin jätevedenpuhdistamolla on AquaGreenin höyrykuivaus- ja pyrolyysilaitos.

Suomessa pyrolyysia on tutkittu osana HSY:n RAHI-hanketta yhteistyössä HAMK:n kanssa. Hankkeessa tutkittiin mahdollisuuksia biohiilen hyödyntämiseen esimerkiksi biojätteen mädätysprosessissa hillitsemään haitallisten rikkivetyjen määrää biokaasussa, sitomaan ammoniumtyyppiä sekä lisäämään mahdollisuuksia hiilen pitkäaikaiseen varastointiin maahan mädätteen mukana. Biohiilen lannoitevaikutuksista on saatu lupaavia tuloksia kasvatus- ja peltokokeissa. (Ikonen 2023). Ämmäsuolla sijaitsevalla pilotointilaitteistolla on testattu lietteen pyrolyysia vuosien 2020-2022 ajan (HSY 2023). Hankkeessa lopputuotteena saadun lietehiilen olomuoto on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Lietehiili HSY:n ja HAMK:in pilotoinneista. (HSY 2021)

Pyrolyysia edeltävän kuivauksen poistoilmasta voidaan periaatteessa ottaa talteen tyypeä strippauksella ja/tai happopesurilla. Saud ym.(2021) tutkivat tätä mahdollisuutta teoreettisesti ja se on varteenotettava menetelmä, mikäli samalla käsitellään mädätteen kuivauksen rejektivesiä. Vastaavaa menetelmää voitaisiin käyttää myös polttoa edeltävän kuivauksen poistoilmalle.

8.2.9 Poltto

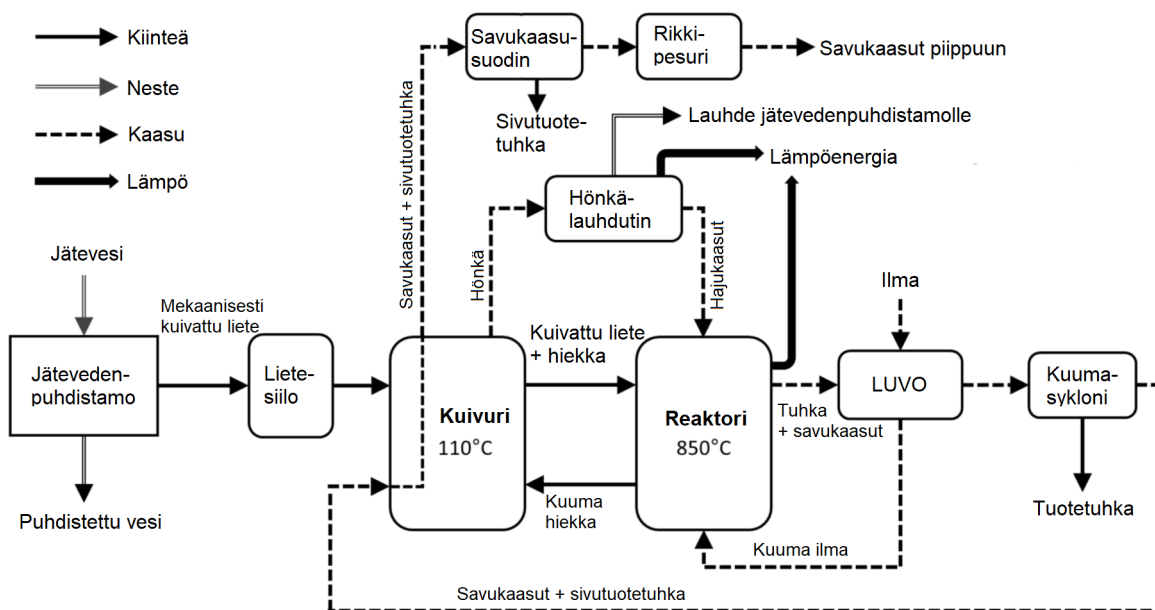
Jätevesilietteen polttoa, kaasutusta ja torrefiontia ei kuvata tässä selvityksessä tarkemmin, sillä niiden ei katsota olevan varsinaisesti ravinteiden talteenottomenetelmiä. Kyseisistä tekniikoista on kattavat kuvaukset VVY:n 2019 julkaisemassa monistesarjassa nro 56: Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Jätevesilietteiden kaasutusta on kehittänyt aikaisemmin saksalainen Sülzle-Kopf, ja kaasutuslaitoksia on toiminnassa kahdella saksalaisella jätevedenpuhdistamolla: Balingenissa ja Koblenzissa. Kyseiset laitokset on otettu käyttöön 2002 ja 2016. Muista käytössä tai suunnitteilla olevista laitoksista ei löytynyt tietoa kirjallisuuskatsauksen yhteydessä. Jätevesilietteen torrefiontia ei ole tiedettävästi testattu täydessä mittakaavassa. Jätevesilietteen polttoon perustuvat Endev- ja EuPhoRe-tekniologiat on esitelty seuraavassa lyhyesti.

8.2.9.1 Endev-teknologia

Suomalaisen Endev Oy:n lietteen erillispolttoon perustuva patentoitu tekniikka tunnettiin aikaisemmin PAKU-nimellä. Menetelmän kehitys on aloitettu Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Tekniikan kehittämisen lähtökohtana on ollut lietteen sisältämien haitta-aineiden kierron katkaiseminen. Endev-teknologian täyden mittakaavan ensimmäinen polttolaitos sijaitsee Rovaniemellä, Napapiirin Energia ja Vesi Oy:n jätevedenpuhdistamon yhteydessä. Laitos on ollut osittain toiminnassa ja sen on tarkoitus olla täydessä toiminnassa loppuvuonna 2023.

Prosessissa mekaanisesti kuivattu liete, jonka kiintoainepitoisuus on noin 20-25 % TS, pumpataan kuivuriin (110 °C). Syötteenä voidaan käyttää myös mädätettyä lietettä. Kuivurin jälkeen 98 % TS liete poltetaan reaktorissa (850 °C). Kuivurin ja reaktorin välillä on kierto, jossa reaktorin kuuma hiekka kierrätetään kuivurille ja kuivurilta hiekkalieteseos menee reaktoriin. Kuivurissa muodostunut hönkä (vesihöyry ja lauhduttimen hajukaasut) käsitellään hönkälauhduttimella ja sen lauhdevesi johdetaan takaisin jätevedenpuhdistamolle. Lauhdeveden laatua tarkkaillaan. Lauhtumattomat hajukaasut johdetaan polttoreaktoriin. (Peltola ym. 2023)

Poltoissa muodostuu ainoastaan lentotuhkaa ja polton hyötysuhde on erittäin korkea. Lentotuhka poistuu reaktorista savukaasujen mukana ja se erotellaan kahdessa vaiheessa: suurin osa tuhkaista (yli 95 painoprosenttia), niin kutsuttu tuotetuhka, kerätään korkean lämpötilan syklonin kautta ilman esilämmittimen (LUVO) jälkeen. Hienojakoisempi pölyfraktio poistetaan pussisuodattimella sivutuotetuhkana. Tuotetuhkan erotus tapahtuu korkeassa lämpötilassa, jolloin raskasmetallit ovat vielä höyryfaasissa ja näin ollen ne kulkeutuvat savukaasujen mukana pussisuodattimille. Savukaasut johdetaan kuivurin kautta pussisuodattimille, jolloin niiden lämpö saadaan hyödynnettyä. Lämpötila pussisuodattimilla on näin ollen alhaisempi, joten raskasmetallit kondensoituvat ja konsentroituvat sivutuotteena syntyvään tuhkaan. Sivutuotetuhkaa muodostuu noin 1 % ja se toimitetaan jatkokäsittelyyn. Lopuksi savukaasujen sisältämä rikki pestään lipeällä märkäpesurissa, jossa muodostunut vesijae voidaan johtaa suoraan vesistöön ja käsitellyt savukaasut piippuun. (Peltola ym. 2023) Savukaasujen NO_x-pitoisuudet ovat olleet alle niille asetetun päästörajan (200 mg/m³). Endev-teknologian periaate on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Endev-teknologia (Peltola ym. 2023).

Polton käynnistyessä reaktorissa tarvitaan tukipolttoainetta, kuten propaania tai kevyttä polttoöljyä. Tukipolttoaineesta voidaan luopua polton käydessä, ja siitä eteenpäin polton energiatase on nettoposiitivinen. Prosessista saatavaa lämpöenergiaa hyödynnetään jätevedenpuhdistamolla ja ylimääräinen tuotettu lämpö voidaan myydä kaukolämpönä. Rovaniemen laitoksella, jonka kuiva-aine syötteessä on 25 % TS, myytävää kaukolämpöä muodostuu 0,9 MWh/t lietettä. Kuivurissa vaadittava lämpöenergiasta puolet saadaan kierrättämällä kuumaa hiekkaa reaktorista ja toinen puolet savukaasujen ohjaamisesta kuivurin läpi. (Peltola ym. 2023)

Poltossa 850 °C -asteessa tuhoutuvat lietteen sisältämät orgaaniset haitta-aineet, mikromuovit ja mikrobit. Lopputuotteeseen päätyy raskasmetalleja ja niiden pitoisuudet on määritetty Rovaniemen laitoksen näytteistä. Analysoitujen näytteiden raskasmetallipitoisuudet olivat alle maa- ja metsätalousministeriön asetuksen (24/2011) pelto- sekä metsälannoituksen rajojen (Peltola ym. 2023). Tämän raportin kirjoitushetkellä voimassa oleva lannoitelainsäädäntö ei salli jätevesilieteperäisen tuhkan käyttöä lannoitteena. Tilanne voi mahdollisesti muuttua uudistuvan lannoitelainsäädännön myötä. Syötteenä käytettävän lietteen laatu vaikuttaa lopputuotteena saatavan tuotetuhkan sisältämiin pitoisuuksiin.

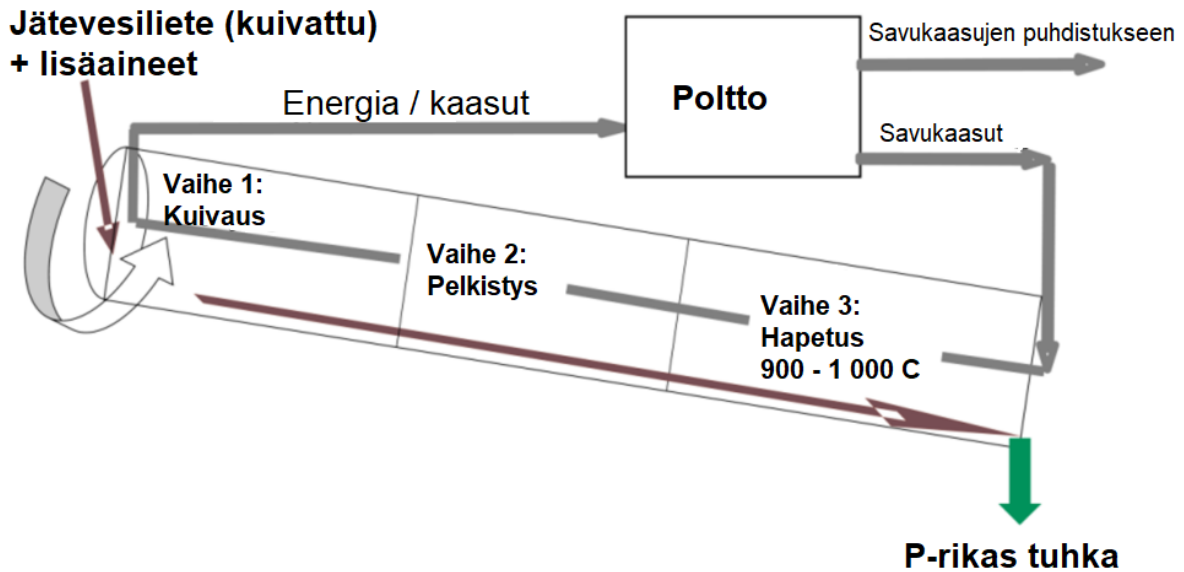
Lopputuotetuhka varastoidaan siloissa ja sitä voidaan jatkojalostaa esimerkiksi rakeistamalla ja lisäämällä samalla muita aineita. Lopputuotetuhkan lannoitevaikutuksia on testattu puun ja turpeen tuhkaan sekoitettuna. Lopputuotetuhkan sisältämä fosfori on hidasliukoisessa muodossa ja sen nähdään soveltuvan toistaiseksi parhaiten metsälannoituskäyttöön. Alhaisten raskasmetallipitoisuuksien puolesta se soveltuisi myös peltoviljelyyn; toistaiseksi fosforin hidasliukoisuus ja heikko soveltuvuus nykyisille levityslaitteistoille estävät lopputuotetuhkan käytön peltolannoitteena.

Rovaniemellä toteutetun laitoksen nimellinen vuosikapasiteetti on 10 000 t lietettä, jonka kuiva-ainepitoisuus on 25 %. (Peltola ym. 2023) Teknologian kustannustehokkuus paranee laitokseen kasvaessa. Laitoksen tilantarve on suhteellisen pieni ja Rovaniemen laitoksen pohjapinta-ala on 300 m². Prosessi on automatisoitu ja se työllistää noin yhden käyttöhenkilön. Tarvittava huolto ja kunnossapito hankitaan ulkopuoliselta toimijalta.

8.2.9.2 **EuPhoRe-teknologia**

EuPhoRe-teknologia on monivaiheinen lämpökemiallinen jätevesilietteen käsittelymenetelmä, jonka lopputuotteena on fosforipitoinen tuhkatuote. Lietteenkäsittelyn ensimmäisessä vaiheessa kuivattuun jätevesilietteeseen (20-40 %TS) lisätään kemikaalia (kuten MgCl₂), jotta raskasmetallien poisto kaasufaasin kautta tehostuu. Kemikaalit myös toisaalta parantavat fosforin liukoisuutta tuhkatuotteessa. Terminen käsittely tapahtuu kaksiosaisessa pyörivässä polttouunissa.

Ensimmäinen lämpökäsittelyvaihe on kuivaus, jonka jälkeen siirrytään pyrolyysin pelkistysvaiheeseen, jossa tapahtuu metallien kemiallinen pelkistyminen ja haihtuminen kaasufaasiin. Tämän jälkeen tapahtuva poltto yli 900 °C:n lämpötilassa takaa haitallisten orgaanisten epäpuhtauksien tuhoutumisen. Lämpötilan noustessa välittömästi pyrolyysivaiheen jälkeen kivennäisaineet kristallisoituvat fosfaattimuotoon, jolloin fosforin käytettävyyttä kasveille paranee. Menetelmän fosforin talteenottoaste käytetystä syötteestä on yli 95 %. (DPP 2018, EuPhoRe® GmbH, Klein ym. 2021) Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. EuPhoRe-teknologia (EuPhoRe® GmbH).

Prosessissa orgaaniset haitta-aineet ja mikromuovit poistuvat. Raskasmetallit sitoutuvat savukaasuihin eivätkä päädy lopputuotteeseen. Prosessissa muodostunut lämpöenergia voidaan ottaa talteen ja hyödyntää. Menetelmän vaatima energia sekä savukaasujen puhdistaminen aiheuttavat merkittäviä kuluja. Optimaalisessa tilanteessa laitos kannattaisi yhdistää jätteenpolttolaitokseen, jolloin saataisiin synergiaetuja energiankäytön ja savukaasujen puhdistuksen osalta. (Klein ym. 2021)

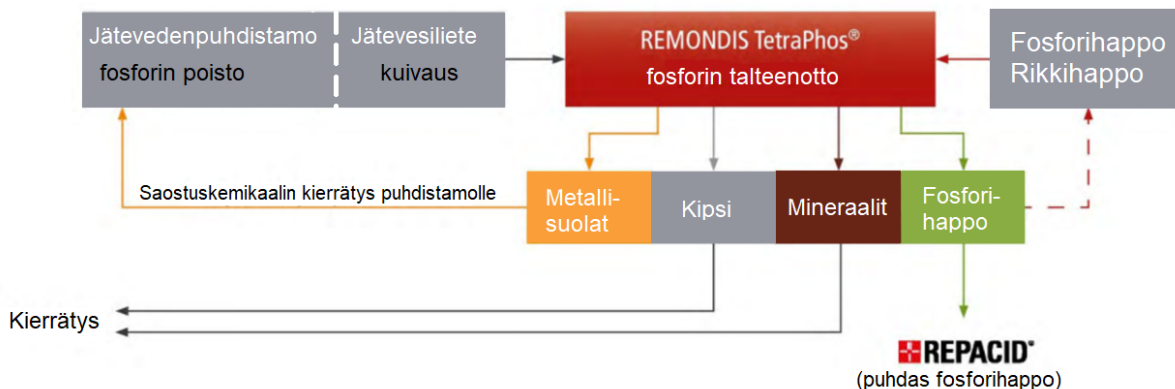
EuPhoRe-teknologia on käytössä ainakin kahdella sveitsiläisellä jätevedenpuhdistamolla Oftringenissa ja Uvrierissa, joiden asukasvastineluvut ovat 320 000 ja 180 000 AVL. Yrityksen internetsivujen mukaan laitoksia on kaikkiaan käytössä kolme, rakenteilla yksi ja neljä suunnitteilla. (DPP 2018, EuPhoRe® GmbH)

8.2.10 Märkäkemialliset talteenottomenetelmät tuhkasta

Jätevesilietteen erillispoltton fosforikkaasta tuhkasta fosfori voidaan erottaa märkäkemiallisilla menetelmillä, joihin valtaosa tuhkan fosforin erotusmenetelmistä perustuu. Tuhkan sisältämästä fosforista suurin osa on sitoutunut kemiallisesti heikkoliukoiseksi rauta- tai alumiinifosfaateiksi ja pienempi osa esimerkiksi kalsiumin kanssa. Ensimmäisenä vaiheena on happokäsittely tuhkan pH-arvon alentamiseksi, jotta fosfori, metallit ja raskasmetallit muuttuvat liukoiseen muotoon. Laskemalla pH-arvo tasolle 1,5 voidaan teoreettisesti 85-95 % tuhkan sisältämästä fosforista saada talteen. (Schaum 2007)

Happokäsittelystä saadaan epäpuhdasta fosforihappoa, joka vaatii jatkokäsittelyn. Eri teknologioiden välillä on eroja siinä, kuinka jatkopuhdistus on toteutettu, mutta näistä ei ole saatavilla tarkempia tietoja menetelmien suojausten takia. Lopputuotteena saadaan korkeampilaatuinen fosforihappo, josta raskasmetallit on poistettu. Puhdistusprosessissa eroteltuja rauta- tai alumiinisuoloja voidaan kierrättää takaisin jätevedenpuhdistamoprosessiin. Prosessissa muodostuu myös kipsiä ja mineraalisia lopputuotteita, joita voidaan mahdollisesti hyödyntää teollisuudessa.

Saksalaisen REMONDIS-yrityksen kehittämä ja patentoima TetraPhos perustuu tähän menetelmään (kuva 28). Menetelmällä saadaan korkealaatuista fosforihappoa (kuva 29), jota voidaan käyttää raaka-aineena lannoitetuotannossa tai muualla teollisuudessa. TetraPhos-menetelmää on piloitu Saksassa. (REMONDIS 2021) Ensimmäinen täyden mittakaavan laitos on rakenteilla Hampuriin ja se on tarkoitus ottaa käyttöön vuonna 2023. Toinen täyden mittakaavan laitoksen on suunnitteilla aloittaa toiminta vuonna 2025 Lünenissä Saksassa. (Kabbe 2023)

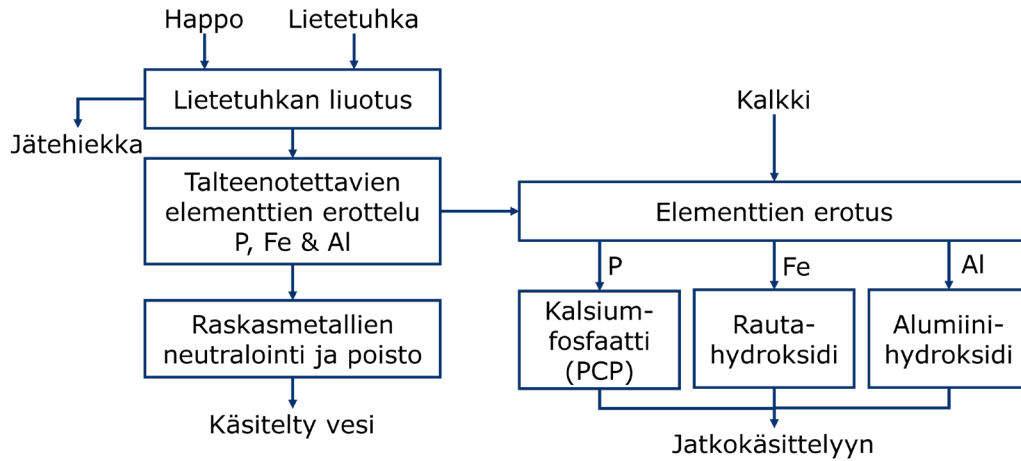


Kuva 28. TetraPhos-menetelmän periaatekaavio (REMONDIS 2021).



Kuva 29. TetraPhos-lopputuote: fosforihappo. (REMONDIS 2018)

Ruotsalaisen EasyMining-yrityksen kehittämä Ash2Phos perustuu myös tuhkan happokäsittelyyn, mutta fosforihapon sijaan sen lopputuotteena saadaan saostettua kalsiumfosfaattia, jota voidaan käyttää suoraan lannoitteena tai lannoitetuotannossa. Se soveltuu myös eläinten ruokintaan. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 30 ja lopputuotteen olomuoto kuvassa 31. Ash2Phos-pilot-laitos on toiminnassa Kemiran alueella Helsingborgissa Ruotsissa. (Cohen 2018) Ensimmäisen täyden mittakaavan laitoksen on tarkoitus aloittaa toimintansa vuonna 2025 Saksassa Schokpaussa ja toinen täyden mittakaavan laitos on suunnitteilla rakennettavaksi Ruotsiin Helsingborgiin. Toisen laitoksen on suunniteltu aloittavan toimintansa vuonna 2026. (Kabbe 2023)



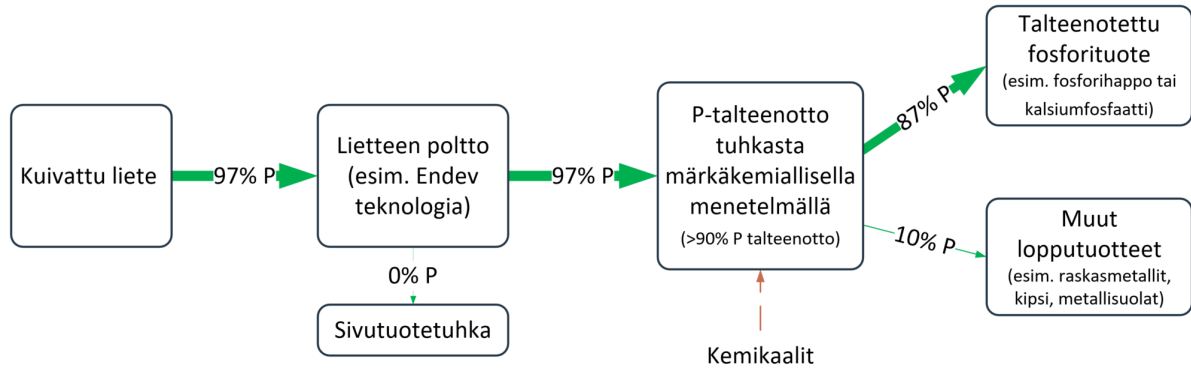
Kuva 30. Ash2Phos-menetelmän periaatekaavio (EasyMining).



Kuva 31. Ash2Phos-lopputuote, kalsiumfosfaatti. (EasyMining)

Molempien teknologioiden (TetraPhos ja Ash2Phos) kaupallinen malli on tarjota fosforin talteenottoa palveluna, joten yritykset vastaavat itse laitoksen rakentamisesta sekä operoimisesta. Märkäkemiallisilla menetelmillä saavutetaan korkea fosforin talteenotto teho jätevesilietetuhkasta. Samalla osa alumiini- ja rautasuoloista saadaan kierrätettyä takaisin jätevedenpuhdistamolle. Menetelmien etuna on raskasmetallien erottaminen tuhkasta. Kaikista muodostuvista jakeista ja niiden määristä ei ole saatavilla kattavasti tietoa. Teknologioilla on ilmoitettu olevan alhainen energiankulutus, mutta vaadittavista kemikaalien määristä ei ole tietoa.

Kuvassa 32 on esitetty fosforin massatase kemiallisen fosforinpoiston jätevedenpuhdistamolle, jonka liete poltetaan ja muodostunut tuhka käsitellään märkäkemiallisesti. Liete sisältää noin 97 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista ja se pidättyy poltossa tuhkaan. Märkäkemiallisilla menetelmillä tuhkan sisältämästä fosforista saadaan talteen jopa yli 90 %, mikä tarkoittaa noin 87 % fosforin talteenottoa suhteessa puhdistamolle tulevasta fosforista. Loppu fosforista päätyy sivutuotteisiin, jotka vaihtelevat käytettävästä menetelmästä riippuen.



Kuva 32. Polton ja lietetuhkan märkäkemiallisen käsittelyn massatase.

8.2.11 Tarkastelun ulkopuolelle jäävät menetelmät ja teknologiat

Muut kehitteillä olevat ja alhaisemman TRL:n menetelmät

- Levä- ja mikrobituotanto on testattu ravinteiden talteenottomenetelmänä. Prosessi voidaan toteuttaa erilaisilla levillä ja mikrobeilla, jotka vaativat optimaaliset olosuhteet (lämpötila, pH, valon määrä jne.) kasville. Tietyt yhdisteet ja haitta-aineet voivat estää levien tai mikrobien kasvun. Skotlannissa on testattu mikrolevää *Chlamydomonas acidophila* pilot-mittakaavassa, ja tuloksien perusteella menetelmä voisi sopia parhaiten pienille jätevedenpuhdistamoille. Menetelmän ensisijainen käyttökohde olisi pienentää vesistöön johdettavan jäteveden ravinnekuormaa. Prosessi on kuitenkin voimakkaasti riippuvainen olosuhteista ja jäteveden laadusta (Escudero ym. 2021). Vastaaviin johtopäätöksiin päädyttiin aiemmin myös Suomessa tehdyssä Leväsieppari-hankkeessa, jossa tutkittiin levien käyttöä ravinteiden talteenotossa jätevesistä (Leväsieppari 2020).
- Hydroterminen nesteytys (Hydrothermal Liquefaction, HTL), joka tunnetaan myös nimellä hydrous pyrolysis eli kostea pyrolyysi. Prosessissa voidaan käyttää kosteita biomassoja tai lietteitä syötteenä, ilman erillistä kuiva-ainetta. Käsittely tapahtuu melko alhaisessa lämpötilassa (300-400 °C) ja korkeassa paineessa (20-30 MPa) (Anstasakis ym. 2018). Kun prosessilämpötila on yli 300 °C suurin osa lietteen sisältämistä lääkeaine- ja torjunta-ainepäästöistä tuhoutuvat (Thomsen ym. 2020). Fosfori sitoutuu prosessin kiintoaineeseen ja lopputuotteena käsittelystä saadaan myös bioöljyä. Tähänastinen tutkimus on selkeästi keskittynyt bioöljyn tuotantoon ja toistaiseksi ei ole kattavaa tietoa fosforirikkaan kiintoainejakeen lannoiteominaisuuksista. Aarhusin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa (Mataveva ym. 2022) havaittiin HTL-prosessin laskevan fosforin käytettävyyttä kasveille ja osa raskasmetallipitoisuuksista ylitti raja-arvot. Näin ollen lopputuote vaatisi käsittelyä ennen kuin se on käytettävissä lannoitteena, ja yksi mahdollisuus olisi ottaa fosfori talteen struviittina.

- Ylikriittinen vesikaasutus (Hydrothermal Gasification, HTG tai Supercritical Water Gasification, SCWG) on käsittelymenetelmä märille lietteille. Liete käsitellään korkeassa lämpötilassa ja paineessa, jotka ovat yli kriittisen pisteen (374 °C ja 22,1 MPa), jossa orgaaniset molekyylit hajoavat kaasuiksi ja epäorgaaniset aineet (kuten fosfori) kiteytyvät. Muodostuneesta kaasusta erotellaan nestejake, jolloin sen sisältämä tyyppi saadaan talteen. Metaania, vetyä ja hiilidioksidiasisältäväkaasu puhdistetaan ja se voidaan hyödyntää energiana. Kiteytyneestä osasta fosfori voidaan ottaa talteen kemiallisella käsittelyllä. Prosessia tehostetaan yleensä katalyyteillä. (Ibrahim ym. 2019, Adar ym. 2020). Menetelmää on pilotoitu ja demonstroitu eripuolilla maailmaa, mutta menetelmä ei ole vielä ollut riittävän kypsä täyden mittakaavan laitokseen (Gutiérrez Ortiz 2022). Euroopassa menetelmää on kehitetty erityisesti Hollannissa, Ranskassa ja Sveitsissä.
- Märkähapetus käsittelyssä (Wet Oxidation, WO) lietettä hapetetaan kemiallisesti korkeassa paineessa (1-22 MPa) ja lämpötilassa (150-330 °C) happea sisältävällä kaasulla. Käsittelyssä orgaaninen aine hajoaa, lietteen tilavuus ja mikrobimäärä laskevat. Fosforin talteenottoa yhdistettynä märkähapetukseen on tutkittu nanosuodatuskalvoihin (Blöcher ym. 2012, Zhao ym. 2023) ja struviitin saostuksella (Munir ym. 2019). Menetelmästä ei ole löydettävistä laboratoriomittakaavaa suurempia kokeiluja.
- Valkofosforin talteenottoon jätevesilietteestä on kehitetty Saksassa FlashPhos-menetelmässä jätevesiliete kuivataan ja jauhetaan, jonka jälkeen siihen lisätään kuonan muodostusainetta, esim. CaO. Seos syötetään reaktoriin (*Flash Reactor*), josta saadaan Flash-kuona jatkokäsiteltäväksi. Reaktorissa muodostuu polttokaasua, joka voidaan hyödyntää lämmöksi. Flash-kuona puhdistetaan kaksin avulla jalostus-prosessivaiheessa (*Refiner*), jossa muodostuu kaasua ja kuona-ainetta. Kaasu sisältää fosforia, joka voidaan ottaa talteen ja ylijäävä lämpö hyödyntää. Kuona-aine puolestaan granuloidaan ja sitä voidaan hyödyntää vaihtoehtona sementille. Prosessi on vielä kehitysvaiheessa ja siitä on testattu Sveitsissä Prattelnissa. (Schimdbberger ym. 2021, Drunsel 2021) Menetelmän talteenottoasteesta tai sen lopputuotteen laadusta ei ole vielä toistaiseksi saatavilla tietoa.
- AshDec on termokemiallinen käsittelymenetelmä jätevesilietetuhkalle, jossa tuhka käsitellään pyörivässä polttouunissa. Menetelmää ovat kehittäneet Outotec ja Saksan liittovaltion materiaalitutkimus- ja testauslaitos (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM). Prosessin lopputuotteena saadaan natriumkalsiumfosfaattia (NaCaPO₄). Prosessissa tuhkan sekaan syötetään natriumsulfaattia (Na₂SO₄), jotka reagoivat 900-1 000 °C lämpötilassa. Raskasmetallit haihtuvat prosessissa ja poistuvat savukaasujen mukana. Syöttestä on mahdollista saada talteen yli 95 % fosforista. Täyden mittakaavan pilotlaitoksia on ollut toiminnassa Itävallassa Leobenissa ja Saksassa Weimarissa. (Kabbe 2019, DPP 2019)
- Paskier®-prosessi on suomalaisen Nanopar-yhtiön kehittämä ja sillä voidaan käsitellä mädätysjäännöstä syntypaikalla. Prosessi koostuu vakuuivusteisesta infrapunakuivaimesta ja sen ympärille kehitetystä lietteen ja mädätteen käsittelyprosessista. Kuivattu liete murskataan, siihen lisätään tarvittaessa ravinteita ja se rakeistetaan pakattavaksi. Infrapunakuivaimia on laajalti käytössä prosessi- ja kaivosteollisuudessa, menetelmä ei vielä ole käytössä jätevesilietteiden käsittelyssä. Ensimmäinen jätevesilietteitä käsittelevä demonstrolaitteisto toimitetaan vuonna 2023 Mikkeliin Sairilan biokaasulaitokselle. Yhtiöllä on pilot-laitteisto Puumalassa, jolla voidaan tuottaa 10-20 kg lannoitetta päivässä. Pilotoinnissa tuotettua lannoitevalmistetta on testattu Puumalan Golf-vihერიöillä ja sillä on tehty ruukkukokeita. Prosessissa taudinaiheuttajat tuhoutuvat 600 asteen säteilylämpötilassa.

Menetelmiä, joiden kehityksen uskotaan loppuneen:

- Märkä-kemiallinen liuotus ja struviitin/CaP:n saostus
 - o ExtraPhos-prosessista viimeisimmät tiedot vuodelta 2018 pilotoinneista Itzehoen jätevedenpuhdistamolla Saksassa (Kabbe 2019). Kyseisistä pilotoinneista ei ole löydetty tuloksia, eikä menetelmästä ole uudemmaa tietoa.
- KREPRO (Kemwater REcycling PROcess), kemiallinen käsittely termisen hydrolyysin lietteelle
 - o Viimeisimmät julkaisut 2000-luvun alkupuolelta (Recktenwald & Karlsson 2003)
- BioCon, tanskalainen ioninvaihtomenetelmä jätevesilietetuhkalle, jossa käytetään myös happoa
 - o Viimeisimmät julkaisut 2000-luvun alkupuolelta (Levlin 2001)
- Aqua Reci
 - o Viimeisimmät julkaisut 2000-luvun alkupuolelta (Stendahl & Jäfverström 2004)
- PHOXNAN, märkähapetuksen ja nanosuodatuksen yhdistelmä
 - o Viimeisimmät julkaisut yli 10 vuotta vanhoja (Blöcher ym. 2012)
- Mephrec
 - o Pilot-laitos on ilmeisesti ollut toiminnassa Nurembergin jätevedenpuhdistamolla Saksassa ja pilotoinnin päätyttyä laitos on ollut tarkoitus purkaa (SAR, 2020).

8.3 Yhteenveto

Seuraavassa yhteenvetotaulukossa on koottu yhteen tarkasteltujen ravinteiden talteenottomenetelmien osalta niissä käytettävä syöte, tekninen kypsyyssaste, talteenottoaste jätevedenpuhdistamolle tulevasta ravinnekuormituksesta, lopputuotteen koostumus, lopputuotteen jatkokäyttö tai -käsittely, lopputuotteen soveltuvuus lainsäädännön näkökulmasta, menetelmän soveltuvuudesta Suomeen sekä menetelmän eduista, haasteista ja muista tiedoista.

Menetelmille esitetty talteenottoaste kuvaa korkeinta teoreettista talteenottoastetta aikaisemmissa kappaleissa esitettyjen massataseiden mukaan. Todellisuudessa talteenottoasteeseen vaikuttaa usea tekijä ja siinä on vaihtelua.

Taulukko 2. Yhteenvetotaulukko tarkastelluista ravinteiden talteenottomenetelmistä.

Talteenotto- menetelmä	Syöte	TRL	Talteenotto- aste (JVP:n tulevasta)	Lopputuotteen koostumus	Lopputuotteen jatkokäyttö / -käsittely	Lopputuotteen soveltuvuus lainsäädännön näkökulmasta	Menetelmän soveltuvuus Suomeen	Edut	Haasteet	Muuta
RAVITA	Jälkisaostettu kemiallinen liete	6-7	≤ 50 % P	Fosforihappo (H ₃ PO ₄)	Voidaan hyödyntää ammoniumin strippauksessa tai raaka-aineena lannoiteteollisuus- udessa	Soveltuvuus riippuu lopputuotteen laadusta ja jatkokäsittelystä	Suunniteltu suomalaisille jäteveden- puhdistamoille, vaatii jälkikäsittelyn	Lopputuote hyvin hyödynnettävissä. Saostuskemikaalia voidaan kierrättää.	Vielä kehitysvaiheessa	Keskitetyn ratkaisun mahdollisuutta selvitetään. Typen talteenotto yhdistettynä stripperiin.
Vivianiitin talteenotto (ViviMag, Kemira)	Mädätetty liete (tai sakeutettu liete)	7	≤ 60 % P	Vivianiittiliete (Fe ₃ (PO ₄) ₂ *8(H ₂ O)) 10 % P 24 % Fe 8 % TOC 26 %TS	Vaatii jatkokäsittelyä kuten puhdistuksen, voidaan hyödyntää raaka-aineena lannoite- teollisuudessa	Riippuvainen vivianiittilietteen jatkokäsittelystä, periaatteessa voi soveltua ainesosaluokkaan (CMC) 12 tai 15	Soveltuu, vaatii mädätyksen. Tiivistetty liete voisi olla vaihtoehto mädätteelle, mutta ei ole vielä pilotoitu.	Teknisesti yksinkertainen ja ei vaadi kemikaaleja	Lopputuote vaatii jatkokäsittelyä ennen kuin käytettävissä lannoitteena tai teollisuuden raaka- aineena	
Struviitin saostus (Useita kaupallisia toimijoita, esim. AirPrex®, ANPHOS®, NuReSys®, Pearl® ja Phosphogreen™)	Rejektivesi	9	≤ 25 % P ≤ 3 % N	Struviitti (MgNH ₄ PO ₃ * 6(H ₂ O)) 12,6 % P 5,7 % N 9,9 % Mg	Voidaan käyttää periaatteessa suoraan lannoitteena, mikäli ravinnesuhteet ovat oikeat. Raskasmetallien ja haitta-aineiden tulee olla alle lainsäädännön rajojen.	EU:n lannoitevalmisteaset- uksen (2019/1009) ainesosaluokka (CMC) 12	Periaatteessa soveltuu, vaatii prosessin muuttamisen biologiseksi fosforinpoistoksi. Huittisen puhdistamalla pilotoitu.	Lopputuote on suoraan käytettävissä lannoitteena	Vaatii BioP:n ja mädätyksen Lopputuotteen laadusta ei vielä kattavasti analyysijä esim. lääkeaineet, orgaaniset haitta- aineet ym.	
Strippaus	Rejektivesi	9	≤ 10 % N	Turussa laimea ammoniakiviesi, voitaisiin ottaa talteen myös ammoniumsulfaatti- liuoksena	Voidaan hyödyntää lannoitteiden tuotannossa tai muualla teollisuudessa	EU:n lannoitevalmisteaset- uksen (2019/1009) ainesosaluokka (CMC) 15	Soveltuu, vaatii mädätyksen–Turun Topinjan laitokselta hyviä tuloksia.	Lopputuotteella on hyvin käyttökohteita	Vaatii lietteen mädätyksen	Ilmastrippaus on todettu haastavaksi, höyrystrippaus on parempi vaihtoehto.
Kalvomenetelmät	Rejektivesi	6-7	≤ 10 % N				Periaatteessa soveltuu, toistaiseksi vähän kokemuksia suuren mittakaavan laitoksista.	Lopputuotteella on hyvin käyttökohteita	Vaatii lietteen mädätyksen Kalvojen tukkeutuminen	

Talteenotto- menetelmä	Syöte	TRL	Talteenotto- aste	Lopputuotteen koostumus	Lopputuotteen jatkokäyttö / -käsittely	Lopputuotteen soveltuvuus lainsäädännön näkökulmasta	Menetelmän soveltuvuus Suomeen	Edut	Haasteet	Muuta
NPHarvest	Rejektivesi	6-7	≤ 10 % N < 43 % P (BioP)	Ammoniumsulfaatti- liuos, jonka NH ₄ pitoisuus noin 2-3 % (n. 25 g/l) Fosforirikas liete, jossa fosfori CaP-yhdisteinä 1-3 % P, 10 % C ja 8 % Ca	Vaatii konsentroinnin tai kiteytyksen mieluiten ennen kuljetusta. Voidaan hyödyntää raaka-aineena lannoitteiden tuotannossa	EU:n lannoitevalmisteaset uksen (2019/1009) ainesosaluokat ammoniumsulfaatille (CMC) 15 ja fosforipitoiselle lopputuotteelle (CMC) 12	Kehitetty Suomessa, täyden mittakaan laitoksia ei ole vielä.	Lopputuotteella on hyvin käyttökohteita	Vaatii lietteen mädätyksen	Fosforirikkaan jakeen jatkokäsittely ja käyttö- mahdollisuudet kehityksessä
Aqua2N (EasyMining)	Rejektivesi	7	≤ 12 % N		Voidaan käyttää periaatteessa suoraan lannoitteena, mikäli ravinnesuhteet ovat oikeat.	EU:n lannoitevalmisteaset uksen (2019/1009) ainesosaluokka (CMC) 15, riippuen lopputuotteen laadusta	Periaatteessa soveltuu, toistaiseksi vähän kokemuksia vain pilotoinneista.	Lopputuote on mahdollista hyödyntää suoraan lannoitteena.	Saatavilla ei ole riittävästi tietoa menetelmästä	
Poltto, Endev	Liete	8-9	-	Fosforipitoinen tuhka n. 10 % P	Nykyisen lainsäädännön puitteissa ei voida käyttää suoraan lannoitteena.	Jätevesilietteen käyttö metsä- ja peltolannoituksessa tällä hetkellä kielletty	Soveltuu Suomeen	Liete hävitetään kokonaan eikä tarvetta jatkokäsittelylle		
Märkämateriaalin käsittely (Ash2Pho – EasyMining, TetraPhos – Remondis)	Tuhka	8	< 86 % P	Ash2Phos: Kalsiumfosfaatti (Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH) 17 % P, 35 % Ca TetraPhos: Fosforihappo (H ₃ PO ₄)	Ash2Phos: voidaan hyödyntää suoraan lannoitteena tai lannoitteiden valmistuksessa TetraPhos: voidaan raaka-aineena lannoitteiden tuotannossa tai muualla teollisuudessa	Ash2Phos: EU:n lannoitevalmisteaset uksen (2019/1009) ainesosaluokka (CMC) 12 TetraPhos: EU:n lannoitevalmisteaset uksen (2019/1009) johdannainen ainesosaluokasta (CMC) 13	Vaatii jätevesilietteen tai mädätetyn lietteen poltton	Korkea fosforintalteenottoaste	Vaatii polton. Kaikista jakeista ei ole saatavilla tietoa.	Ensimmäiset täydenmittakaavan laitokset suunnitteilla/rakenteilla

9. Teknillistaloudellinen kokonaisanalyysi valittujen prosessien osalta

9.1 Analyysin lähtökohdat ja lähestymistapa

Kun tarkastellaan yhdyskuntajätevesien ravinteiden talteenottoon kehitettyjä ja käytettyjä menetelmiä ja arvioidaan niiden käytettävyyttä ja potentiaalia Suomen olosuhteissa ja markkinatilanteessa, on lähtökohtana huomioitava jätevedenpuhdistuksen tämän päivän tilanne ja kehitystrendit sekä etenkin puhdistamoilta jätejakeina muodostuvien lietteiden käsittelyn ja loppukäytön tilanne ja kehityssuunta.

Tässä suhteessa keskeisiä reunaehtoja ja ajureita ovat:

- Yhdyskuntajätevedenpuhdistamoita on Suomessa noin 350 kpl, joista yli 100 000 avl puhdistamoita on 6 kpl ja 50 000 – 100 000 avl puhdistamoita 10 kpl ja loput tätä pienempiä
- Kuormitukseltaan painopistealue on Etelä- ja Lounais-Suomi, jonne puhdistamolietteiden ja niiden sisältämien ravinteiden tuotanto painottuu
- Jätevesistä fosfori saadaan poistettua lähes kokonaan ja se poistuu puhdistamoilta sitoutuneena vain ja ainoastaan puhdistamolietteeeseen. Puhdistamon sisäisissä kierroissa fosforia voi kuitenkin olla prosesseista riippuen suuriakin määriä liukoisessa muodossa erilaisissa rejektivesijakeissa.
- Fosforin poistoon käytetään Suomessa pääosin kemiallista saostusta, mutta jonkin verran myös biologista fosforinpoistoa ja näiden yhdistelmiä. Biologisen fosforinpoiston käytön lisääminen on kuitenkin teknisesti melko helppoa pienin lisäinvestoinnein, jos siihen olisi muutakin tarvetta, kuin kemikaalikustannuksien alentaminen. Biologinen fosforinpoisto on prosessina herkempi ja vaatii käyttäjiltä enemmän prosessitekniistä osaamista kuin kemiallinen saostus, mikä on osaltaan rajoittanut menetelmän yleistymistä Suomessa.
- Isoilla puhdistamoilla on toteutettu tehokas yli 70 %:n kokonaistypenpoisto ja suurin osa pienemmistäkin laitoksista on varustettu ainakin osittaisella typenpoistolla tai nitrifikaatiolla. Typenpoiston tehostaminen edelleen on yksi uuden EU:n yhdyskuntajätevesidirektiiviluonnoksen tarkasteluista. Jätevesien tyyppistä pääosa poistuu ilmaan tyyppikaasuna ja vain noin 10...15 % sitoutuu puhdistamolietteisiin.
- Puhdistamolietteistä yli 80 % käsitellään tällä hetkellä mädättämällä biokaasuprosesseissa ja osuus on edelleen kasvamassa. Noin 61 % lietteistä mädätetään puhdistamoiden yhteydessä (20 kpl) ja 22 % lietteistä kuljetetaan keskitettyyn biokaasulaitokseen.
- Lannoitteiden raaka-aineiden hinnat ovat olleet nousussa viime vuosina. Fosfaattikiven ja urean keskimääräiset markkinahinnat ovat kolminkertaistuneet vuodesta 2020 (World Bank 2023). Valmiiden lannoitotuotteiden hinnoista laskien fosforin hinta on noin 10 €/kgP ja typen hinta 2 €/kgN (Lantmännen, 2023)

Näistä lähtökohdista yhdyskuntajätevesien koko fosforisisällöstä (3 830 tP/a) noin 80 % eli runsaat 3 000 tP/a on mukana biokaasuprosesseissa käsiteltävässä lietteessä osin kiintoaineeseen sitoutuneena ja osin vesijakeessa. Jos tämä kaikki fosfori saataisiin talteen, se olisi teoreettisesti 26 % Suomessa käytettävästä teollisten lannoitevalmisteiden fosforimäärästä (11 500 kgP/a). Merkille pantavaa on, että jo tällä hetkellä 80 % yhdyskuntajätevesien sisältämästä fosforista on erilaisten biokaasulaitosten prosesseissa. Näissä laitoksissa käsitellään yleisesti vähintään 50 000 asukkaan lietemäärä ja kokonaisvolyymiin suhteutettuna pääosa fosforikuormasta on yli 100 000 asukkaan lietteitä käsittelevissä biokaasulaitoksissa. Tämä tarkoittaa sitä, että ravinteiden talteenottoon liittyvä potentiaali on jo nyt varsin suurissa laitoksyksiköissä, joita Suomessa on lukumäärällisesti enintään noin 40 kpl. Menetelmiä ei ole tämän vuoksi välttämättä tarpeen eikä kustannustehokasta kehittää lainkaan alle 50 000 asukkaan laitoskoluokkaan.

Lietteen mädätys voidaan nähdä lähinnä eräänlaisena esikäsittelynä, jossa orgaanisen aineen määrää vähennetään ottamalla siitä energiaa talteen. Ravinteet eivät pelkässä mädätyksessä vielä poistu mihinkään. Mädätyksen jälkeen jäljellä on yli puolet alkuperäisestä lietemassasta, jolle on tehtävä jotain. Tämän mädätysjäännöksen jatkokäsittelyn toteutustapa on keskeinen kysymys ravinteiden talteenoton kannalta. Jos jatkokäsittelyprosessi mahdollistaisi tehokkaasti ravinteiden talteenoton lisäksi myyntituloja, olisi lietteen tuottajan kannalta houkuttelevaa.

Poltto on Suomessa vielä harvinainen lietteen käsittelymenetelmä, sillä sen osuus on vain 2,3 % kaikesta puhdistamolietteestä. Poltto voidaan nähdä kuitenkin lisääntyvänä lietteen käsittelymenetelmänä. Se ei kuitenkaan välttämättä korvaa mädätysprosesseja vaan toimii lähinnä mädätetyn lietteen jatkokäsittelynä, jossa hyötykäytön kannalta hankalasta mädätysjäännöksestä päästään eroon ja ravinteet saadaan tuhkasta erotettua helpommin ja puhtaampina jakeina. Mädätys, poltto ja tuhkan jatkokäsittelymenetelmät muodostavat yhden potentiaalisimmista menetelmäyhdistelmistä, jos hyötykäytön kannalta hankalasta mädätysjäännöksestä (raskasmetallit, mikromuovit, haitta-aineet) halutaan päästä eroon ja riittää, että fosfori saadaan tuhkasta talteen puhtaampana jakeena.

Mädätysjäännöksessä oleva hiili voidaan polttamisen sijasta hyödyntää myös maanparannusaineena, jolloin vaihtoehtoina ovat lähinnä tähän asti paljon käytetty jälkikompostointi ja uudempana menetelmänä erilaiset pyrolyysiprosessit, joissa liete prosessoidaan ravinnepitoiseksi lietehiileksi.

Pelkästään kompostoimalla lietteistä käsitellään enää 14 % ja sen osuus on koko ajan pienentynyt, kun pienempienkin puhdistamoiden lietteitä on alettu kuljettamaan biokaasulaitoksille. Biokaasulaitoksen sijasta myös pelkkä poltto keskitetyissä laitoksissa voi olla yleistyvä käsittely niille lietteille, jotka vielä käsitellään vain kompostoimalla. Pelkän kompostoinnin voidaan arvioida vähentyvän edelleen ja jäävän marginaaliseksi jo lähivuosina.

Ravinteiden talteenotto voi tapahtua lähinnä vain jätevedenpuhdistamon eri prosessivaiheista erotetusta lietteestä tai lietteiden käsittelyprosesseissa syntyvistä rejektivesijakeista. Rejektivesistä tapahtuvassa fosforin talteenotossa voidaan saada maksimissaan noin puolet jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista talteen ja tuestä tyypillisesti noin 10...15 %. Lietteen kiintoainejakeeseen jää vähintään puolet jäteveden fosforista ja alle 10 % tuestä. Jos jäteveden fosforista haluttaisiin saada mahdollisimman suuri osa talteen yhdellä menetelmällä, on ainoa vaihtoehto lietteen polttaminen ja fosforin talteenotto tuhkasta.

Jos tavoitellaan yhtä hyvää fosforin talteenottoastetta kuin polttoon ja tuhkan käsittelyyn perustuvilla menetelmillä, on tämä toteutettavissa erilaisilla menetelmäyhdistelmillä siten. Esimerkiksi magneettisella erotusmenetelmällä erotetaan rautafosfaatti lietteen kiintoainejakeesta lannoitevalmisteiden raaka-aineeksi ja jäljelle jäävä orgaanista hiiltä ja loput fosforista sisältävä jäännös prosessoidaan erikseen maanparannusaineeksi. Tällainen maanparannusaine voi olla esimerkiksi kompostimultaa tai pyrolyysillä tuotettua lietehiiltä. Fosforin talteenotosta saavutetaan silloin kiintoainejäännöksen loppukäsittelyn kannalta se etu, että pienemmän fosforipitoisuuden omaavan hiilijäännöksen sijoittamiseen riittää pienempi peltopinta-ala.

Fosforin talteenotto rejektivesistä tulee kysymykseen lähinnä silloin, jos jätevedenpuhdistusprosessissa fosforin poisto tehdään pääosin biologisesti. Suomessa tämä edellyttäisi ensin puhdistamoprosessien modifiointia kemiallisesta saostuksesta biologiseen fosforinpoistoon soveltuviksi.

Fosforin talteenoton toteuttaminen lietteestä ei kuitenkaan ole kustannustehokasta eikä muutenkaan tarkoituksenmukaista, jos mädätysjäännös tai liete poltetaan, koska fosfori on paljon tehokkaammin erotettavissa tuhkasta märkämateriaalilla menetelmillä.

9.2 Kustannustarkastelu

9.2.1 Talteenoton kustannustarkastelun lähtökohdat

Teknillisaloudellisessa tarkastelussa ei oteta huomioon mädätyksen kustannuksia, sillä sen katsotaan olevan jo osa tavanomaista jätevedenpuhdistusprosessia. Tähän peilaten myös lietteen poltto on nähtävissä osana jätevedenpuhdistusprosessia, jonka kustannukset eivät suoranaisesti liity ravinteiden talteenottoon. Sen sijaan poltossa syntyvän tuhkan sekä mädätyksessä syntyvän mädätysjäännöksen ja rejektiveden jatkokäsittelyprosessit otetaan huomioon ravinteiden talteenottoon liittyvinä kustannuksina.

Tarkastelussa on esitetty ravinteiden talteenottoon liittyvät kustannukset arvioituina kokonaiskustannuksina, jotka sisältävät menetelmien pääomakustannukset (CAPEX) ja käyttökustannukset (OPEX). Pääomakustannukset on laskettu vuotuisina kustannuksina käyttämällä investoinnin annuiteettina kerrointa 0,08, joka vastaa 20 vuoden kuoletusaikaa ja 4 %:n korkotasoa. Näin lasketuissa kustannuksissa ei ole mukana lopputuotteiden myynnistä mahdollisesti saatavia tuottoja tai mahdollisia säästöjä itse puhdistusprosessissa. Osasta menetelmiä on saatavissa vain kokonaiskustannus silloin, jossa puhdistamoliete toimitetaan palveluntuottajalle, joka vastaa koko käsittelyprosessista ja lopputuotteista. Näissä ns. porttihinnoissa on silloin jo huomioitu myös lopputuotteista saatavat tuotot kustannuksia vähentävänä tekijänä.

Kustannustietoja on saatu eri menetelmien kehittäjiltä, laitetoimittajilta ja kirjallisista lähteistä. Tietoja on yhteismittalistettu ja suhteutettu sekä käsiteltäviin liete- ja jätevesimääriin että saataviin lopputuotteiden ravinnemääriin (P ja/tai N). Kustannuksia on laskennassa tarkasteltu ensin asukasvastineluvultaan 100 000 asukkaan jätevesikuormitusta vastaavaan kokoluokkaan ja muutettu sitten yksikköhinnoiksi €/kgP, €/jv-m³, jne.

Koska eri talteenottomenetelmiä käytettäessä jää jäljelle laadultaan ja määrältään erityyppisiä lietejäännöksiä, on näiden jakeiden jatkokäsittelykustannukset laskettu erikseen ja huomioitu sitten lietteenkäsittelyn kokonaiskustannuksina sisältäen ravinteiden talteenottoprosessin ja lietejäännöksen loppukäsittelyn kustannukset (50 €/t lietettä). Talteenottomenetelmät ja niiden kustannukset eivät lopputuotteiden eroavaisuudesta johtuen ole suoraan keskenään vertailukelpoisia, eikä laskelmissa ole huomioitu mahdollisesta puolivalmisteiden jatkokäsittelystä muodostuvia kustannuksia.

Vielä kehitysvaiheessa olevien menetelmien kustannusten vertailuun liittyy paljon epävarmuustekijöitä ja toistaiseksi Suomessa ei ole täysin toiminnassa olevia täyden mittakaavan talteenottolaitoksia. Tässä esitettäviä kustannuksia on pidettävä vain karkeasti suuntaa antavina tarkkuustason jäädessä alueelle +/- 50 % kaikkien menetelmien osalta. Tarkoituksena on lähinnä peilata ravinteiden talteenotosta aiheutuvien lisäkustannusten tasoa toisaalta lopputuotteista mahdollisesti saataviin tuottoihin ja teollisten epäorgaanisten lannoitevalmisteiden kustannustasoon sekä toisaalta puhdistamoiden tavanomaisen lietteenkäsittelyn kustannustasoon ja puhdistamon muissa prosesseissa mahdollisesti saavutettaviin säästöihin.

9.2.2 Menetelmäkohtaiset kustannukset

9.2.2.1 Struviittisaostus

Struviittisaostusta voidaan käyttää lähinnä puhdistamoilla, joilla on käytössä biologinen fosforinpoisto, jolloin fosforia on rejektivedessä liukoisessa muodossa ja saadaan siitä saostettua magnesium-ammonium-fosfaatiksi. Fosforin talteenottoaste jätevedenpuhdistamolle tulevasta kuormasta on 20-35 %. Vaihtelua talteenottoasteessa on muun muassa riippuen jäteveden lämpötilasta. Menetelmällä saatavaa struviittia on joissakin olosuhteissa mahdollista käyttää lannoitteena sellaisenaan, jos ravintesuhteet ovat kohteeseen sopivat. Maissa, joissa biologista fosforinpoistoa on enemmän käytössä ja struviittisaostus yleisempää, voidaan lopputuotteesta saatavalla tuotolla kattaa käytännössä menetelmän kemikaalikustannukset ja kuljetuskustannukset. Tuottoja ei ole tässä vertailussa kuitenkaan huomioitu.

Menetelmän kustannustasoksi saadaan pelkän fosforin talteenotto-prosessin osalta noin 9 €/kgP ja 0,07 €/jv-m³. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset huomioiden vertailukustannustaso on 0,14 €/jv-m³.

Loppuosa lietejäännöksestä on jatkokäsiteltävä esimerkiksi orgaaniseksi maanparannusaineeksi joko kompostoimalla tai pyrolyysikäsitellyllä. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset on laskettu aikaisemmin mainitulla 50 €/t kustannuksella ja ne ovat mukana lopullisessa vertailuhinnassa.

9.2.2.2 Haihdutus ja strippaus

Biokaasulaitosten rejektivesissä on runsaasti tyypeä ammoniumtyyppinä. Riippuen toteutustavasta rejektiveden korkea tyyppitoisuus voi aiheuttaa ongelmia joko itse biokaasuprosessissa, jos tyyppi alkaa konsentroitumaan liete-prosessiin, tai jätevedenpuhdistamon pääprosessissa, jossa ylimääräinen ammoniumtyypikuorma aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, jotta puhdistusvaatimukset saavutetaan. Tämän vuoksi typen poistaminen rejektivesistä on joka tapauksessa tarpeellista. Jos rejektiveden tyyppi pystytään vielä hyödyntämään ravinteena, voi se pienentää kustannuksia lopputuotteesta saatavan tuoton kautta.

Biokaasulaitoksilla on jo jonkin verran käytetty sinänsä hyvin perinteisiä ja vakiintuneita menetelmiä, haihdutusta ja strippausta, joilla ammoniumtyppi saadaan erotettua rejektivedestä ja väkevöityä nestemäiseksi ammoniakkivedeksi tai ammoniumsulfaatiksi. Näitä voidaan käyttää joko suoraan peltoon levitettävänä tyypilannoitteina tai lannoitevalmistuksen raaka-aineina.

Menetelmän kustannustasoksi saadaan pelkän typen talteenotto-prosessin osalta noin 6 €/kgN ja 0,08 €/jv-m³. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset huomioiden vertailukustannustaso on 0,15 €/jv-m³.

Fosforia näillä menetelmillä ei saada erotettua. Typen osalta talteenottoaste puhdistamolle tulevasta tyypikuormasta on melko vaatimaton eli tyypillisesti 10...15 % luokkaa. Näin saatavilla tyypituotteilla pystyttäisiin kattamaan noin 2...3 % Suomessa lannoitteisiin tarvittavasta tyypestä. Näin ollen pelkästään ravinteiden talteenoton näkökulmasta menetelmällä ei ole kovin suurta potentiaalia, mutta paikallisesti sillä voi olla iso merkitys laitoksen oman toiminnan, kustannusten hallinnan ja hiilijalanjäljen kannalta. Kun puhdistusprosessiin palautuu talteenoton myötä pienempi tyypikuorma, vaikuttaa se energiakustannuksiin sekä suoriin ilmapäästöihin (esim N₂O).

9.2.2.3 NPHarvest

NPHarvest-menetelmässä voidaan ottaa talteen ammoniumtyyppiä ja fosforia mädätteen rejektivedestä. Fosforin talteenotto on tehokasta pääasiassa vain puhdistamalla, jolla on biologinen fosforinpoisto. Vastaavasti kuin haihdutuksen ja strippauksen yhdistelmällä, NPHarvestilla saadaan ehkäistyä ongelmia mädätysprosessissa sekä pienennettyä puhdistusprosessiin palautuvaa ammoniumtyppikuormaa. Saavutettavat hyödyt ovat vastaavat kuin edellisessä kappaleessa.

NPHarvestia pilotoitaessa lopputuotteena saadun ammoniumsulfaattiliuoksen pitoisuus on alhainen, joten se vaatii konsentroimisen esimerkiksi haihduttamalla. Tällöin lopputuotteen arvo nousee ja kuljetuksen tarve laskee. Ammoniumsulfaattia voidaan käyttää joko suoraan peltoon levitettävänä typpilannoitteina tai lannoitevalmistuksen raaka-aineina.

Fosforipitoisen lopputuotteen kehitys on vielä kesken, joten NPHarvestin kustannukset on esitetty vain talteen saatavaa tyyppiä kohden.

Menetelmän kustannustasoksi saadaan pelkän tyypin talteenottoprosessin osalta noin 14 €/kgN ja 0,14 €/jv-m³. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset huomioiden vertailukustannustaso on 0,28 €/jv-m³.

NPHarvestin kustannuksissa on huomioitu lopputuotteen konsentroidin haihduttamalla. Loppuosa lietejäännöksestä on jatkokäsitteltävä esimerkiksi orgaaniseksi maanparannusaineeksi joko kompostoimalla tai pyrolyysikäsitteillä. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset on laskettu aikaisemmin mainitulla 50 €/t kustannuksella ja ne ovat mukana lopullisessa vertailuhinnassa.

9.2.2.4 RAVITA

RAVITA-menetelmässä jäteveden fosfori saostetaan vasta aivan viimeisenä prosessivaiheena kemialliseksi lietteeksi, josta se uutetaan fosforihappoa sisältäväksi lopputuotteeksi. Näin voidaan saada enintään 50 % tulevan jäteveden fosforista talteen. Loppuosa fosforista jää puhdistamon aiemmista prosessivaiheista poistettaviin lietejakeisiin ja niistä lopulta mädätettyyn lietteeseen, jota prosessoidaan edelleen esimerkiksi orgaanista ainetta sisältäväksi maanparannustuotteeksi. Menetelmän kehitysprojektien yhteydessä on tehty alustavia kustannusarvioita investointi- ja käyttökustannuksista. Tässä menetelmässä kustannukset on syytä jaotella erikseen jälkisaostusprosessille ja varsinaiselle fosforin talteenottoprosessille, sillä jälkisaostusprosessi voi olla jo muistakin syistä tarpeellinen osa jätevedenpuhdistusprosessia, eikä siten välttämättä ravinteiden talteenottoon liittyvä lisäkustannus.

RAVITA-menetelmän kustannustasoksi saadaan pelkän fosforin talteenottoprosessin osalta noin 18 €/kgP ja 0,13 €/jv-m³ ja jälkisaostusprosessin kanssa yhteensä 29 €/kgP ja 0,21 €/jv-m³. Lietteen jatkokäsittelyn kustannukset huomioiden vertailukustannustaso on 0,29 €/jv-m³.

Kustannuksissa ei ole huomioitu mahdollisia lietteen tai lopputuotteen kuljetuskustannuksia, vaan oletuksena on, että koko prosessointi tehtäisiin jätevedenpuhdistamon yhteydessä, jolloin myös saostuskemikaalin kierrätys uudelleen käytettäväksi onnistuu lyhyillä putkiyhteyksillä.

9.2.2.5 Vivianiitin erotus magneettisesti

Mädätetystä lietteestä voidaan erottaa raudan kanssa vivianiitiksi sitoutunutta fosforia magneettisilla erottimilla, jolloin talteenottoaste voi olla noin 60 %.

Menetelmän kustannustasoksi saadaan pelkän fosforin talteenotto-prosessin osalta noin 7 €/kgP ja 0,06 €/jv-m³. Lietteiden jatkokäsittelyn kustannukset huomioiden vertailukustannustaso on 0,13 €/jv-m³.

Tällä menetelmällä saatava rautafosfaattiliete ei vielä sellaisenaan sovellu lannoitteeksi. Siitä muodostuu lähinnä lannoitevalmistuksen tai muun teollisuuden raaka-ainetta, joka vaatii vielä jatko-prosessointia. Rautafosfaattiliete on myös todennäköisesti kuljetettava jatkojalostuspaikkaan. Kuljetettava määrä on kuitenkin vain noin 10 % alkuperäisestä lietemäärästä. Kuljetuskustannukset ja jatko-prosessointikustannukset arvioidaan katettavan lopputuotteesta saatavalla tuotolla. Loppuosa mädätetystä lietejäännöksestä on jatkokäsiteltävä esimerkiksi orgaaniseksi maanparannusaineeksi joko kompostoimalla tai pyrolyysikäsitellyllä. Lietteiden jatkokäsittelyn kustannukset on laskettu aikaisemmin mainitulla 50 €/t kustannuksella ja ne ovat mukana lopullisessa vertailuhinnassa.

9.2.2.6 Poltto

Puhdistamoliete voidaan polttaa joko puhdistamon yhteyteen rakennetussa polttolaitoksessa tai liete voidaan kuljettaa muualla sijaitsevaan suurempaan polttolaitokseen. Keskitetty laitos voi olla joko kaukolämmöntuotantoon tarkoitettu useita eri polttoaineita käyttävä lämpölaite tai biokaasulaitoksen yhteyteen rakennettu lietteenpolttolaitos. Puhdistamolietteen yhteispoltossa tulee huomioitavaksi jätteen polton vaatimukset mm. luvituksen ja savukaasujen käsittelyn osalta. Tuhkan lannoitekäyttöä ohjaava lainsäädäntö on tähän asti rajoittanut puhdistamolietteen polttamista voimalaitoksissa, mutta tilanne on mahdollisesti muuttumassa tekeillä olevien asetusmuutosten myötä.

Ravinteiden talteenoton näkökulmasta puhdistamoliete olisi poltettava erikseen, jotta siitä saatavasta tuhasta voitaisiin erottaa fosfori tehokkaasti. Tämän vuoksi lietteen erillispoltto biokaasulaitosten yhteydessä on varteenotettava ratkaisu, koska silloin laitoksen yksikkökoko on jo valmiiksi riittävän iso ja tukipolttoaineena voidaan käyttää samasta lietteestä saatua biokaasua. Biokaasulaitokset sijaitsevat joko isoimpien jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä tai erillisinä keskitettyinä laitoksina, joihin lietteitä kuljetetaan pienemmiltä puhdistamoilta. Yli 80 % Suomen puhdistamolietteistä kuitenkin käsitellään jo biokaasulaitoksilla, joten lietteiden kuljetusmatkojen minimoimiseksi polttolaitosten olisi järkevää sijoittua puhdistamoiden läheisyyteen. Polttolaitoksilta tuhka kuljetetaan todennäköisesti suoraan käyttöön tai jatkokäsittelyyn. Tuhkaa voidaan tietysti edellytyksin käyttää myös sellaisenaan lannoitekäyttöön, jos säädöksiin tulossa olevat muutokset sen mahdollistavat.

Menetelmän kustannustasoksi saadaan poltto-prosessin osalta noin 9 €/kgP ja 0,13 €/jv-m³. Polton kustannukset on esitetty ns. porttihintana, joka pitää silloin sisällään tuhkan loppukäytön nettokustannukset eli se on samalla menetelmän vertailuhinta.

Tämä hintataso on laskettu mädättämätöntä lietettä polttavalle laitokselle. Jos poltetaan mädätettyä lietettä, jossa palavaa orgaanista ainesta on vähemmän, joudutaan mahdollisesti käyttämään tukipolttoaineita ja tällöin kustannustaso on jonkin verran korkeampi. Toisaalta energiaa on silloin otettu lietteestä biokaasuna, jolloin sitä voidaan käyttää jäännöslietteiden tukipoltossa tai ainakin huomioida se taselaskennassa.

9.2.2.7 Tuhkan märkäkemiallinen käsittely

Fosforin talteenotto uuttamalla tuhkasta märkäkemiallisilla menetelmillä voidaan tehdä suurimpien polttolaitosten yhteyteen tehtävissä yksiköissä. Tuhkaa on mahdollista varastoida pitkiäkin aikoja tai toisaalta sitä voidaan kuljettaa pidempiäkin matkoja jatkokäsittelyyn, sillä määrä on pieni verrattuna alkuperäiseen märkälietemäärään. Näitä laitoksia ei vielä ole täydessä mittakaavassa käytössä ja Euroopassa ensimmäiset ovat vasta rakenteilla. Alustavia kustannustietoja näistä hankkeista on saatu ja ne on ilmoitettu porttihinntana eli sisältävät kaikki investointi- ja käyttökustannukset nettomääräisinä. Menetelmillä saatavat lopputuotteet ovat korkealaatuinen fosforihappo tai rakeistettua kalsiumfofaatti, jotka soveltuvat teknisesti sellaisenaan lannoitekäyttöön tai lannoitetuotantoon. Suoran lannoitekäytön ehtona on, että ravinesuhteet on säädetty kuhunkin käyttökohteeseen sopiviksi.

Menetelmän (Ash2Phos) kustannustasoksi saadaan pelkän fosforin talteenotto prosessin osalta noin 3 €/kgP ja 0,04 €/jv-m³.

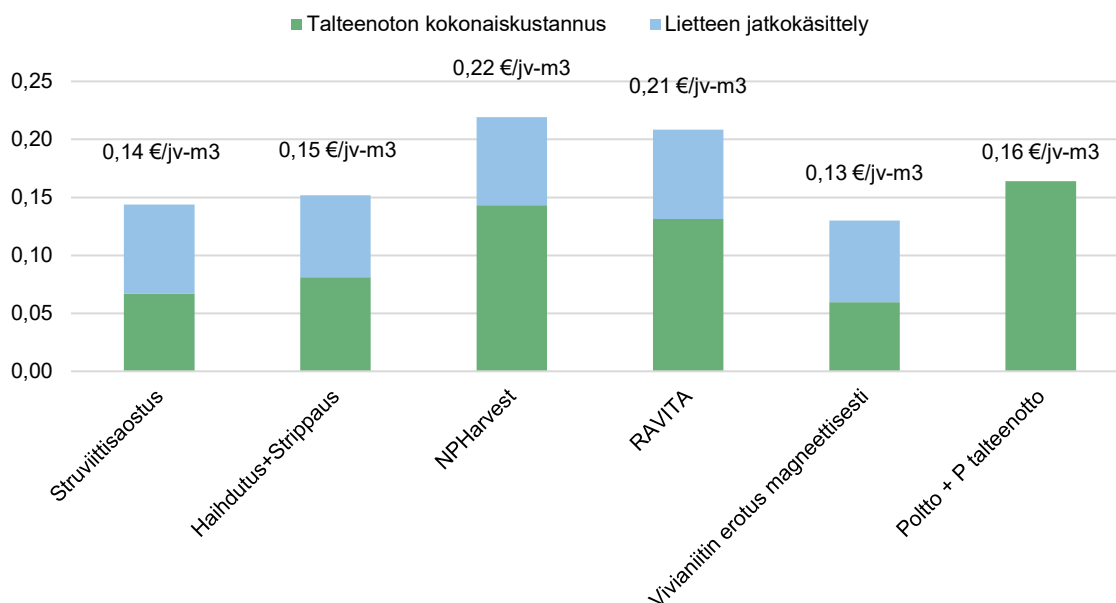
Kokonaisuutena polton ja tuhkan märkäkemiallisen käsittelyn vertailukustannustaso on 0,16 €/jv-m³.

9.3 Yhteenveto

Eri menetelmien ravinteiden talteenoton ja lietteen jatkokäsittelyn vertailukustannustasot on esitetty kuvaajassa 12. Menetelmien vertailukustannukset on yhteismitallistettu ja niissä on huomioitu investointi- ja käyttökustannukset. On huomioitava, että menetelmien kustannuksiin liittyy paljon epävarmuuksia, ja erityisesti vielä kehitteillä olevien menetelmien todellisia kustannuksia on mahdoton arvioida tarkasti. Vertailukustannuksien tarkkuustaso on näin ollen luokkaa ± 50 %.

Nykyisellään mädätetään jo 80 % puhdistamolietteistä. Mädätyksestä aiheutuvia kustannuksia ei ole huomioitu niiden menetelmien kohdalla, jotka vaativat mädätetyn lietteen syötteenä. Kuvaajassa 12 esitetty vertailuhinta RAVITA-menetelmälle ei sisällä jälkisaostuksen osuutta, joka on esitetty kappaleessa 9.2.2.4. Polton ja märkäkemiallisen fosforin talteenottomenetelmän vertailuhinnat poikkeavat muista menetelmistä, sillä molemmat perustuvat ns. kokonaispalvelun porttihinntoihin eikä niiden investointi- ja käyttökustannuksia ole erikseen laskettu.

Monen talteenottomenetelmän kohdalla talteen saatava ravinnepitoinen lopputuote ei ole vielä sellaisenaan käytettävissä maataloudessa vaan vaatii jatkokäsittelyä. Tästä aiheutuvia kustannuksia ei ole tarkasteltu osana tätä selvitystä. Lopputuotteiden laadut vaihtelevatkin merkittävästi toisistaan, joten menetelmät eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia tältä osin.

Ravinteiden talteenoton ja lietteen jatkokäsittelyn vertailukustannus (€/jv-m³)

Kuvaaja 12. Ravinteiden talteenoton ja lietteen jatkokäsittelyn vertailukustannus (€/jv-m³), tarkkuustaso ± 50 %.

Ravinteiden talteenottoon on markkinoilla olemassa riittävän kypsää teknologiaa täyden mittakaavan laitosten rakentamiseksi. Referenssilaitosten lukumäärä on vielä hyvin rajallinen ja käyttökokemuksia on kertynyt vasta lyhyeltä ajalta ja vain joidenkin tekniikoiden osalta. Täysin markkinaehtoiseen investointiin nämä asettavat rajoitteita ja riskejä tällä hetkellä.

Ravinteiden talteenotto ei ole vielä kovin kannattavaa liiketoiminnallisesti ilman tukea ja ennustettavan pitkäkestoisen markkinanäkymän luontia lainsäädännön keinoin. Fosforin tai typen erottaminen jätevedenpuhdistamoiden ainevirroista aiheuttaa käytännössä aina lisäkustannuksia jätevedenpuhdistamoille ja sitä kautta edelleen vesihuoltolaitosten asiakkaiden jätevesimaksuihin korotustarvetta. Vesihuoltolaitosten intressi ravinteiden talteenoton edistämiseen liittyy laajemmin puhdistamolietteiden asianmukaisen ja kustannustehokkaan käsittelytavan saavuttamiseen pitkäaikaisena kokonaisratkaisuna. Joissakin tapauksissa typen talteen ottaminen rejektivesikierroista voi tulevaisuudessa olla laitoksille houkuttelevaa osana typenpoiston kokonaistehokkuuden parantamista.

Jossain määrin vesihuoltolaitokset ja puhdistamot ovat siirtäneet ravinteiden talteenottoon liittyvät intressit lietteiden jatkokäsittelystä vastaaville toimijoille, kuten biokaasulaitoksille. Vielä on epäselvää, kohdistuvatko tulevaisuudessa mahdollisesti voimaan astuvat vaatimukset ravinteiden talteenottoon liittyen jätevedenpuhdistamoihin vai lietteen jatkokäsittelijöihin. Siitä aiheutuvat kustannukset valuvat kuitenkin viime kädessä jäteveden tuottajilta perittäviin jätevesimaksuihin. Tästä näkökulmasta menetelmät, joilla aikaansaadaan kustannustehokas kokonaisratkaisu puhdistamolietteiden asianmukaiseen käsittelyyn, olisivat potentiaalisimpia.

Tarkasteltaessa puhdistamolietteistä saatavien fosforituotteiden kustannustasoa voidaan todeta, että niissä fosforin hinta on jo samaa tasoa kuin teollisissa lannoitteissa tällä hetkellä on. Eri menetelmillä saatavissa tuotteissa on kuitenkin eroja siinä, kuinka paljon prosessointia ne vielä vaativat ennen kuin ovat samalla tavalla käytettävissä lannoitteena kuin teolliset lannoitteet.

Vesihuoltolaitoksilla ei ole kovin suurta intressiä lähteä itse kehittämään lannoitetuotantoa, vaan vesihuoltolaisten näkökulmasta edullisinta olisi, että kehitys tapahtuisi lannoitteiden valmistukseen ja markkinoitiin keskittyneiden toimijoiden toimesta.

Fosforin talteenoton osalta teknistaloudellisesti potentiaalisimmat menetelmät Suomen olosuhteissa näyttäisivät tässä vaiheessa olevan vivianiitin erotus magneettisesti sekä lietteen poltto ja fosforin erottaminen tuhkasta märkämateriaalilla menetelmillä. Polton etuna on lisäksi se, että lietejäännöksestä päästään samalla eroon ja käsittelyssä poistuu mikromuovit ja haitta-aineet. Myös struviittisaostus on muuten samalla tasolla edellisten kanssa, mutta sen rajoitteena on lähinnä biologisen fosforinpoiston vähäinen käyttö Suomessa tällä hetkellä.

RAVITA-menetelmä on vielä sen verran kehitysvaiheessa, että kovin tarkkoja ja pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei ole tässä vaiheessa mahdollista tehdä. Siinä isona etuna on kemikaalien sisäinen kierrätysmahdollisuus ja sen mahdollistamat kustannushyödyt. Sama koskee NPHarvest-menetelmää, jonka kehitystyössä on tähän mennessä keskitytty typen talteenottoon rejektivedestä ja soveltuvuus fosforin talteenottoon vaatii vielä jatkokehitystä. NPHarvestin etuna muihin typen talteenottomenetelmiin, kuten haihdutukseen, on sen alhainen energiankulutus.

Typen talteenottoon biokaasulaitosten rejektivesistä potentiaalinen menetelmä on perinteinen haihdutus ja strippaus. Tällä, kuten muillakin typen talteenottomenetelmillä, tehostetaan samalla jätevedenpuhdistamon typenpoiston tehokkuutta typen sisäinen kierto katkaisemalla.

10. Kestävän kehityksen näkökulmat

10.1 Kestävän kehityksen globaalit ja kansalliset tavoitteet

YK:n kestävän kehityksen tavoiteohjelma

YK:n kestävän kehityksen tavoiteohjelma Agenda 2030 ohjaa kestävän kehityksen edistämistä vuoteen 2030 saakka. Tavoitteena on turvata hyvinvointi ympäristölle kestäväällä tavalla.

Ohjelman toteutus vaatii siirtymistä kiertotalouteen. Agenda 2030:ssa valtiot sitoutuvat luonnonvarojen tehokkaampaan käyttöön, resurssien kierrätykseen ja kestäviin tuotanto- ja kulutustapoihin. Materiaalien kierrätyksen odotetaan luovan myös uusia työpaikkoja ja talouskasvua (Sitra, 2020).



Kuva 33. Jätevesien ravinteiden talteenoton kytkennät SDG-tavoitteisiin: 9 kestävä teollisuus, innovaatioita ja infrastruktuureja sekä 13 ilmastotekoja (Sitra, 2020).

Euroopan vihreän kehityksen ohjelma

Vihreän kehityksen ohjelmassa (EU Green Deal) komissio määrittelee sitoutumisensa ilmasto- ja ympäristöhaasteiden ratkaisemiseen. Ohjelman avulla EU:ssa laitetaan käytäntöön YK:n agenda 2030 toimintaohjelmaa. Ohjelman perusosia ovat mm. teollisuuden kannustaminen puhtaaseen kiertotalouteen ja tutkimustyön hyödyntäminen ja innovoinnin edistäminen. (European Commission, 2019)

Kansallinen Agenda 2030-tiekartta

Suomi on laatinut kestävän kehityksen Agenda 2030 mukaisen tiekartan v. 2021. Tässä on määritelty visio v. 2030, jonka mukaan suomalaisilla yrityksillä on vahva kädenjälki kokonaiskestävyyttä vahvistavissa ratkaisuissa, kuten bio- ja kiertotaloudessa ja teollisissa innovaatioissa. Yrityksen tuottavat lisäarvoa liiketoimintamalleilla, joiden tavoitteena on taloudellinen, ekologinen ja sosiaalinen kestävyys. Kestävyyttä edistäviä innovaatioita ja yritystoimintaa tuetaan ja arvostetaan. Koulutusta ja osaamista päivitetään jatkuvasti.

Visiota konkretisoimaan tiekartassa on määritelty mm. seuraavat tavoitteet:

Talouden arvonluonnissa, yritystoiminnassa, uusissa työpaikoissa ja viennissä painottuvat kestävä lisäarvoa tuottavat ja hiilnegatiivista yhteiskuntaa rakentavat bio- ja kiertotalouden ratkaisut, teolliset ja muut innovaatiot sekä digitaaliset ja aineettomat tuotteet ja palvelut.

- Tutkimus-, kehitys-, innovaatio- ja osaamispanostukset kestävyyttä edistäviin ratkaisuihin ja yritysten kehittämiseen ovat korkealla tasolla.
- Tuotannon ympäristöhaittoja tunnistetaan ja vähennetään ja niiden kustannuksia sisällytetään hintoihin koko elinkaaren osalta.
- Uusiutumattomien luonnonvarojen kotimainen käyttö on vähentynyt. Samalla vähemmästä saadaan enemmän: resurssituottavuus ja materiaalien uusiokäyttöaste ovat nousseet monenlaisilla kiertotalouden ratkaisuilla. Suomen globaali kädenjälki resurssiviisaiden ratkaisujen viejänä on vahvistunut.
- Hyvä ja johdonmukainen sääntely, laaja-alainen mittaristo, julkiset hankinnat, ennustettava investointiympäristö sekä markkinaehtoisuus ja asiakaslähtöisyys ohjaavat kulutusta ja tuotantoa.

(Valtioneuvosto, 2020)

Suomi toteuttaa YK:n kestävän kehityksen tavoiteohjelmaa laatimansa tiekartan avulla. Ravinteiden talteen ottaminen ja kierrättäminen jätevesistä on konkreettinen tapa tavoitteiden saavuttamiseen ja uuden osaamisen ja liiketoiminnan synnyttämiseen.

10.2 Kestävä kehitys lannoitetuotannossa

Epäorgaanisten lannoitteiden vuotuisten kasvihuonekaasupäästöjen on arvioitu olevan noin 700 miljoonaa tonnia hiilidioksidia (Mt CO₂-e), josta jopa puolet muodostuu tuotannosta, tuotannon energian tarpeesta ja kuljetuksista. Loput puolet muodostuu lannoitteiden käytöstä. (IFA 2022).

Typpilannoitteiden yleisin tyyppi on ammoniumnitraatti, joka valmistetaan ammoniakista ja typpihaposta. Ammoniakin tuotanto on energiaintensiivistä ja tuotannossa käytetään pääasiassa maakaasua energian lähteenä. Typpihapon valmistuksessa syntyy typpioksiduulipäästöjä, joiden ilmastovaikutus on kasvihuonekaasuista suurin.

Lannoitteissa käytettävä fosfori louhitaan apatiittikaivoksissa ja jalostetaan tyypillisesti fosforihapoksi. Fosforin jalostamiseen kuluu paljon energiaa ja siinä tarvitaan rikkihappoa. Fosforikaivokset kuormittavat ympäristöä myös monin tavoin ja vaikuttavat alueen biodiversiteettiin. Lannoitteiden hiilijalanjälkeen vaikuttaa merkittävästi raaka-aineiden ja tuotteiden kuljetukset.

Kierrätyslannoitteet nähdään potentiaalisena vaihtoehtona pienentämään lannoitteiden hiilijalanjälkeä. Paikallisesti tuotetut kierrätyslannoitteet ovat tärkeitä myös huoltovarmuuden näkökulmasta.

10.3 Ravinteiden talteenottomenetelmät kestävän kehityksen näkökulmasta

Tarkemmin tarkasteltujen ravinteiden talteenottomenetelmiä tarkastellaan karkeasti kestävän kehityksen näkökulmasta. Menetelmistä ei ole juurikaan tehty elinkaarianalyyskejä, joiden mukaan niitä voitaisiin vertailla keskenään, eivätkä ne ole täysin vertailtavissa lopputuotteiden eroavaisuuksien vuoksi. Taulukossa 3 on arvioitu talteenottomenetelmiä keskenään karkeasti asteikolla hyvä (+), neutraali (0) ja huono (–) niiden energian tarpeen, kemikaalien kulutuksen ja lopputuotteen kuljetuksen suhteen.

Taulukko 3. Ravinteiden talteenottomenetelmien arviointi kestävän kehityksen näkökulmasta, asteikko hyvä (+), neutraali (0) ja huono (–).

Talteenottomenetelmä	Energia	Kemikaalit	Lopputuotteen kuljetus
RAVITA	-/0	0	?
Vivianiitin talteenotto	-	+	0
Struviitin saostus	+/0	-	+
Haihdutus + Strippaus	-	-/0	-
NPHarvest	+/0	-	-
Poltto, Endev	+	+	0
Märkäkemiallinen käsittely	?	-	+

RAVITA-prosessi kuluttaa sähköenergiaa ja fosforihappoa, jota voidaan kierrättää. Lisäksi fosforin saostamiseen käytettyä kemikaalia saadaan talteen, jota voidaan hyödyntää uudelleen puhdistusprosessissa. Lopputuotteen lopullista fosforipitoisuutta ei ole toistaiseksi tiedossa, joten ei voida tarkkaan arvioida minkälainen kuljetuksen tarve sille muodostuu.

Vivianiitin talteenotossa ViviMag-menetelmää käyttäen sen magneetin vaatima energia on merkittävä käyttökustannustekijä. Prosessissa ei tarvita kemikaalien lisäystä. Vivianiitin erottaminen lietteestä pienentää jatkokäsittelyyn kuljetettavan lietteen määrää. Lopputuotteen laatu ei kuitenkaan ole soveltuva suoraan peltovetykseen, joten se vaatii kuljetuksen jatkokäsittelyyn, tai jatko-prosessoinnin syntypaikalla.

Struviitin saostuksessa energian tarve muodostuu pitkälti pumppauksesta ja sekoittamisesta. Prosessissa tarvitaan magnesiumlisäystä ja pH:n säätäminen tehdään yleisimmin lipeällä. Lopputuote voidaan säkittää paikan päällä ja kuljettaa optimaalisessa tilanteessa suoraan maanviljelijöille.

Haihdutuksen ja strippauksen yhdistelmässä erityisesti haihdutus vaatii paljon energiaa. Lopputuote määrittelee kemikaalien käytön tarvetta. Rikkihappoa käytetään lopputuotteen ollessa ammoniumsulfaattiliuos. Typpivettä valmistettaessa sitä ei tarvita. Haihdutuksessa muodostuva typpipitoinen lietekonsentraatti kuljetetaan jatkokäyttöön tai -käsittelyyn. Kuljetuksen tarve riippuu typpiveden tai ammoniumsulfaattiliuoksen konsentraatiosta.

NPHarvest-menetelmässä energiaa kuluu pääasiassa pumppaukseen ja sekoittamiseen. Kemikaaleina puolestaan käytetään kalsiumkarbonaattia tai -hydroksidia pH:n säätämiseen ja fosforin talteenottoon sekä rikkihappoa, jotta lopputuotteena on ammoniumsulfaattiliuos. Ilman erillistä konsentroitintia prosessista muodostuva liuos on laimeaa ja kuljetuksen tarve on merkittävä. Liuosta voidaan konsentroida esimerkiksi haihduttamalla.

Poltto Endev-tekniologialla on täysin tai lähes energiaomavarainen eikä siinä tarvita kemikaaleja lukuun ottamatta savukaasujen käsittelyä. Lopputuotetuhkan määrä on huomattavasti alhaisempi verrattuna syötetyn lietteen määrään, joten kuljetuksen tarve laskee merkittävästi.

Tuhkan märkämateriaaliset menetelmät ovat patentoituja teknologioita ja niiden energian tarpeesta ei ole tarkkaa tietoa. Prosessissa tarvitaan happoa fosforin uuttamiseen ja esimerkiksi Ash2Phos-menetelmässä kalkkia lopputuotteen tuottamiseen. Lopputuotteiden laatu on korkea ja parhaimmassa tapauksessa ne voidaan kuljettaa suoraan loppukäyttäjälle.

11. Suositukset ja toimenpiteet jätevesiperäisten ravinteiden talteenoton ja kierrätyksen edistämisen ohjauskeinoiksi

Viimeisten 25 vuoden aikana on tapahtunut kehitystä yhdyskuntajätevesien ravinteiden talteenotossa ja kierrätyksessä ja viime vuosina panostuksia on lisätty enenevässä määrin. Suurta läpimurtoa typen tai fosforin talteenotossa ei ole vielä tehty. Erilaisilla ohjauskeinoilla voitaisiin vauhdittaa uusien teknologioiden käyttöönottoa merkittävästi, vaikka markkinalähtöinen tarve ohjaakin kehitystä eteenpäin.

Lainsäädäntö

Lainsäädännön avulla vaikutetaan lannoitemarkkinan ennustettavuuteen ja pitkäjänteisyyteen, mikä mahdollistaa markkinaehtoisen kierrätyslannoitteiden liiketoiminnan kehittämisen.

Lainsäädännöllä voidaan vaikuttaa kierrätyslannoitteiden käytön lisäämiseen poistamalla rajoitteita loppukäyttökohteissa ja mahdollistamalla näin markkinan kehittymisen vetovoimaa.

Huoltovarmuuskulmasta kierrätyslannoitteiden maatalouskäytön helpottaminen ja ravinteiden ohjaaminen maatalouteen on ensisijaista. Lisäksi kansallisesti tulisi arvioida, onko jätevesiperäisten kierrätyslannoitteiden metsälevitystä tarpeen helpottaa, jotta uutta markkinaa tuotteille synnytetään riittävästi.

Toinen tapa edistää kierrätyslannoitteiden käyttöä on vaikuttaa lainsäädännöllisiin työntövoimatekijöihin. Yksi tällainen keino on arvioida, voidaanko tuotesäätelyn keinoin velvoittaa lannoitevalmisteissa tiettyä kierrätyslannoiteosuutta samaan tapaan, kuin jakeluvelvoite toimii liikennepolttoaineiden kohdalla uusiutuvien polttoaineiden käytön lisäämiseksi.

Kolmantena keinona on asettaa EU-direktiivien ja kansallisen lainsäädännön keinoin velvoitteita jätevedenpuhdistamoille, biojäte- ja biokaasulaitoksille ravinteiden talteenottoon. Tämä toimenpide ei välttämättä yksistään riitä, jos markkinat eivät kehity vastaavasti siten, että lannoitteiden raaka-aineille, puolivalmisteille tai tuotteille olisi aitoa kysyntää. Kysyntää voidaan ohjata lainsäädännöllä yllä esitetyillä keinoilla.

Todennäköisesti kysyntä tulee kasvamaan lähitulevaisuudessa epäorgaanisten lannoitteiden hintojen noustessa, saatavuuden kiristyessä ja eri teollisuusalojen kysynnän (mm. akkuteollisuus) lisääntyessä. Yksi mahdollinen skenaario onkin, että puhdistamolietteistä saatavat fosforipitoiset jakeet ohjautuvatkin lannoitekäytön sijasta mm. akkuteollisuuden tarpeisiin, jossa niistä saatava tuotto voi olla huomattavasti korkeampi kuin lannoitekäytössä. Talteen saatavalle tyypelle on myös teollisia käyttökohteita, esimerkiksi Topinojan biokaasulaitoksen tuottama typpivesi hyödynnetään teollisuudessa. Tässä tilanteessa olisi tehtävä harkintaa, onko huoltovarmuuden näkökulmasta tarpeen joillakin ohjauskeinoilla priorisoida ravinnevirtojen käyttötarkoitusta, vai onko markkinaehtoinen ohjautuminen kokonaisuuden kannalta riittävää.

Veroratkaisut

Verotuksella voidaan vaikuttaa jossain määrin kierrätyslannoitteiden kysynnän lisäämiseen ja markkinan luomiseen. Arvonlisäverokannan alentaminen näiden osalta (14 tai 10 %) tai poistaminen jopa kokonaan olisivat suoria ohjauskeinoja, jotka edistäisivät kierrätyslannoitteiden käytön kasvua.

Laitosinvestointien avustukset

Jätevedenpuhdistamoille ja vesihuoltolaitoksille kynnys investoida ravinteiden talteenottoon voi olla korkeahko ilman siihen velvoittavaa lainsäädäntöä, vaikka monet laitokset haluavatkin olla alan edellä kävijöitä ja näkevät talteenoton positiiviset mainehyödyt. Laitokset voivat hyötyä talteenotosta taloudellisesti joko säästöinä muun veden- ja lietteenkäsittelyn käyttökustannuksissa tai saamalla lannoiteraaka-aineesta, puolivalmisteesta tai valmiista tuotteesta myyntituloja. Investoinnin takaisinmaksuaika voi kuitenkin muodostua erittäin pitkäksi ennen markkinan kypsymistä, jolloin hankkeiden subventointi valtion tasolta edesauttaa niiden eteenpäin menoa.

Laitokset voivat olla kiinnostuneita investoimaan uuteen teknologiaan myös säästöjen näkökulmasta, kun talteenotolla voidaan pienentää muita puhdistamon kustannuksia. Tällaisia ovat esimerkiksi puhdistamon energia- ja kemikaalikustannukset sekä laajennuksen vaatima investointikustannus, esimerkiksi typenpoiston tehostamiseen liittyen. Jos halutaan edistää ravinteiden talteenottoa puhdistamoilla, on kustannustehokkaampaa kohdistaa taloudellinen tuki esimerkiksi suorien energiatukihankkeiden sijaan sellaisiin talteenottoprosesseihin, jotka mahdollistavat lisäksi puhdistamon energiankulutuksen vähentämisen.

Energia- ja kemikaalikustannusten ohella kolmas keskeinen käyttökustannusten muodostaja puhdistamoilla on puhdistamolietteen jatkokäsittely. Ravinteiden talteenoton tekniikat kytkeytyvät pääsääntöisesti juuri puhdistamolietteen käsittelyyn joko itse lietevirran tai rejektivesien käsittelyn kautta. Lietteenkäsittelyssä hyväksyttäviin menetelmiin on liittynyt pitkän aikaa merkittäviä epävarmuustekijöitä niin lainsäädännön kuin yleisen mielipideilmaston muuttuessa. Tämä on aiheuttanut myös haasteita ja ehkä hidasteitakin lietteenkäsittelyyn liittyvien tekniikoiden kehitykselle ja investointien toteuttamiselle.

Jätevedenpuhdistamoita operoiville vesihuoltolaitoksille puhdistamolietteen prosessointi ja tuotteistaminen ei ole niiden ydintoimintaa, vaan lähinnä välttämätön keino päästä jätteestä eroon hyväksyttävällä tavalla. Tämä lähtökohta tulisi ottaa huomioon ohjauskeinoja kehitettäessä. Vesihuoltolaitosten näkökulmasta tekniikat, jota takaavat kustannustehokkaan ja yleisesti hyväksyttävän tavan päästä puhdistamoilla muodostuvista lietteistä eroon pitkäaikaisena ja kestäväenä ratkaisuna ovat ensisijaisia.

Parhaimmillaan ravinteiden talteenottolaitosten taloudellisen tukemisen vaikutukset ulottuvat laajemmin puhdistamoiden toimintaympäristöön ja ovat tällöin paremmin perusteltuja. Useissa tapauksissa ravinteiden talteenotto puhdistamoilla tuottaa raaka-ainetta tai puolivalmistetta lannoiteteollisuuden käyttöön. Markkinan luominen näille voi vaatia yhtä lailla teollisen kierrätyslannoitetuotannon taloudellista tukemista, jonka avulla luodaan kysyntää puhdistamoilla talteen otettaville ravinteille.

Laitosten investointiavustukset mahdollistavat uuden taloudellisen toiminnan alkusysäyksen, joka niiden tarkoitus tuleekin olla. Pitkällä aikavälillä ja teknologioiden kypsyessä markkinat muotoutuvat kysynnän ja tarjonnan mukaan siten, että investoinnit ovat kannattavia puhtaasti liiketoiminnallista lähtökohdista. Tähän pääseminen vaatii pitkään tueksi myös lainsäädännöllisiä ohjauskeinoja.

TKI-panostukset

Talteenottotekniikoiden kehitystyötä on tehty jo vuosikymmeniä. Kuitenkin vasta viime vuosina niiden kehitys on ollut yksi tutkimuslaitosten ja yliopistojen kärkiteemoista. Tutkimukseen on järkevää panostaa edelleen julkisten rahoitusinstrumenttien avulla uusien talteenotto-prosessien kehittämiseksi ja johtuen mm. eri erotustekniikoiden, kuten kalvotekniikat, kiihtyvistä kehitysvauhdista.

Koska useat teknologiat ovat jo nykyisin varsin kypsässä kehitysvaiheessa, saavutetaan suurin hyöty julkisesta rahoituksesta todennäköisesti silloin, kun ne kohdistetaan kehitystoimintaan oikeassa toimintaympäristössä. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset pilotointihankkeet puhdistamoilla tai start up -tyyppisten yritysten toimintaedellytysten tukeminen, jotta ne voivat skaalata innovaationsa suurempaan mittakaavaan. Julkisten TKI-panostuksien tarpeellisuutta on tarkasteltava myös lannoitevalmistajien näkökulmasta ja kierrätyslannoitteiden markkinan toimivuuden varmistamiseksi, vaikkakin yleisesti monet lannoitetehtaat ovat monikansallisia suuryrityksiä, joiden omat TKI-panostukset ovat riittäviä.

Suoraan tekniikoiden kehittämiseen suunnatun tuen ohella on tärkeää lisätä myös puhdistamolietteiden ja niistä saatavien tuotteiden koostumuksen ja vaikutusten tutkimukseen ja kattavaan seurantaan. Tätä tarvitaan varmistamaan kierrätystuotteiden turvallinen käyttö ja löytämään oikeat käyttökohteet kullekin tuotteelle. Olennaista on tuottaa kattavaa ja luotettavaa tutkimustietoa hälventämään puhdistamolietteisiin liittyviä — ehkä jossain määrin vanhentuneitakin — mielikuvia.

Tiedottaminen

Ravinteiden talteen ottaminen jätevesistä ja lietteistä toimii osana huoltovarmuuden lisäämistä maataloudessa uuden maailmanjärjestyksen aikana, jolloin raaka-aineiden ja tuotteiden saatavuudesta globaaleilla markkinoilla ei voida kaikissa tilanteissa olla varmoja. Toisaalta tällä hetkellä jätevesiperäisiin tuotteisiin suhtaudutaan usein varauksellisesti kuluttajien ja elintarviketeollisuuden piirissä.

Oikean tiedon välitystä eri sidosryhmille on tehtävä osana toimivan kierrätyslannoitemarkkinan luomista. Yhteistyötä on tehtävä mm. Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliiton MTK:n ja sen alaliittojen kanssa sekä elintarviketeollisuuden etujärjestön kanssa. Myös kansalaisille kohdistuvaa tiedottamista eri kanavien kautta tarvitaan. Suoraa maanviljelijöille kohdistuvaa neuvontaa on tuettava.

12. Yhteenveto

Ravinteiden talteenoton mahdollisuudet jätevedestä on tunnistettu ja talteenottomenetelmien kehityksessä on tapahtunut viimeisten vuosien aikana paljon edistystä. Samaan aikaan tietoisuus lietteiden sisältämien raskasmetallien, mikromuovien ja muiden haitta-aineiden vaikutuksista on kasvanut ja näiden päätymistä pelloille halutaan rajoittaa. Uudistunut ja uudistumassa oleva lainsäädäntö vaikuttaa lietteen hyötykäyttöön niin viherrakentamisessa, maisemoinnissa kuin maa- ja metsätaloudessa. Muuttuneesta maailman tilanteesta johtuen epäorgaanisten lannoitteiden raaka-aineiden hinnat ovat nousseet viime vuosien aikana moninkertaisiksi. Edellä mainittujen seikkojen myötä onkin tärkeää tarkastella mahdollisia vaihtoehtoja turvaamaan riittävät ravinteet suomalaisen maatalouden käyttöön mahdollisimman puhtaassa muodossa. Yksi ratkaisu olisi ottaa fosforia sekä typpeä talteen jätevesistä, jätevesilietteistä tai jätevesilietetuhkasta.

Ympäristöministeriö on tukenut ravinteiden kierrätystä jo yli kymmenen vuotta ja tavoitteena saavuttaa läpimurto ravinteiden kierrätyksessä. Rahoitusta ravinteiden kierrätykseen on jaettu myös Euroopan Unionin elpymis- ja palautumistukivälineen rahoitusta vuosille 2021-2025. Viimeisin uusi tukikokonaisuus aihepiiriin myönnettiin varautumisen ministeriötyöryhmän toimesta maaliskuussa 2022, jolla voidaan suunnata tukea yhdyskuntien jätevesien ravinne- ja energiapotentiaalin hyödyntämiseen.

Suomalaiset jätevedenpuhdistamot ovat tyypillisesti biologiskemiallisia rinnakkaissaostuslaitoksia. Biologinen fosforinpoisto on käytössä vain yksittäisillä jätevedenpuhdistamoilla; niissä riittävä puhdistusteho varmistetaan jälkisaostuksella. Fosforin saostamisella kemiallisesti saavutetaan alhainen vesistökuormitus ja tällöin lähes kaikki tuleva fosfori päättyy puhdistamolietteeseen saostuneena. Biologisessa typenpoistoprosessissa suurin osa tyyppistä vapautuu ilmaan typpikaasuna, selvästi pienempi osa päättyy lietteeseen ja lähes saman verran päättyy vesistöön. Näistä lähtökohdista erityisesti fosforin talteenotolla on paljon potentiaalia korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita tai niiden raaka-aineita. Typen talteenoton potentiaali tähän on pienempi, mutta sen merkitys korostuu, kun tarkastellaan jäljelle jäävää rejektiveden kierron kautta puhdistusprosessiin palaavaa kuormitusta.

Tämän selvityksen tavoitteena oli kerätä yhteen ajantasainen tieto eri ravinteiden talteenottomenetelmistä ja tarkastella niiden soveltuvuutta Suomeen. Selvitys on rajattu fosforin ja typen talteenottoon. Hiilen ja orgaanisen aineen maanparannusvaikutukset jäivät selvityksen ulkopuolelle. Tarkastelussa otettiin huomioon menetelmien tekninen kypsyyssaste, saavutettava talteenottoaste, lopputuotteen laatu ja käytettävyys lannoitteena, raaka-aineena lannoitetuotannossa tai teollisuudessa sekä menetelmien investoinnista ja käytöstä aiheutuvat kustannukset. Osana selvitystä on tarkasteltu menetelmien soveltuvuutta Suomen nykyiseen vesihuoltoon ja soveltuvuutta arvioitujen tulevien muutoksien mukaisiin tilanteisiin. Menetelmistä saatavissa oleva tieto on vielä tällä hetkellä eri tasoista ja työssä tunnistettiin tarve lisätutkimukselle.

Selvityksen tarkempaan tarkasteluun valittiin teknisesti kypsempiä menetelmiä (TRL > 6-7), ja joiden katsotaan soveltuvan Suomen olosuhteisiin ja toimintaympäristöön. Tarkempaan tarkasteluun valikoituivat seuraavat talteenottomenetelmät:

- Struviitin saostus
- Strippaus
- Kalvomenetelmät
- NPHarvest
- RAVITA
- Fosforin talteenotto vivianiittina
- Pyrolyysi
- Poltto
- Märkäkemialliset talteenottomenetelmät tuhkasta

Myös pyrolyysiprosessi ja Aqua2N-menetelmä esiteltiin kappaleessa 8, jossa myös alemman TRL-tason menetelmiä kuvattiin lyhyesti. Pyrolyysiprosessia ei otettu huomioon kaikissa tarkasteluissa, sillä se ei ole ensisijaisesti fosforin tai typen talteenottomenetelmä. Sillä saadaan lietteen hiili stabiiliin olomuotoon, jonka jälkeen lopputuote soveltuu ensisijaisesti maanparannusaineeksi. Aqua2N-menetelmä on mielenkiintoinen typen talteenottomenetelmä, mutta siitä ei ole riittävän kattavasti tietoja saatavilla, jotta esimerkiksi sen kustannuksia olisi ollut mahdollista arvioida.

Menetelmät ovat vielä eri vaiheessa kehitystä. Osasta menetelmistä on jo pidempään kokemusta täydenmittakaavan laitoksissa, kun taas toisia on vasta pilotoitu. Menetelmistä saatavien lopputuotteiden laatu vaihtelee myös merkittävästi menetelmien välillä. Osaa lopputuotteista voitaisiin käyttää suoraan lannoitteena, mikäli ravinnesuhteet ovat sopivat. Osa lopputuotteista vaatii enemmän jatkokäsittelyä tai ne soveltuvat enemmän raaka-aineiksi lannoiteteollisuuteen tai muualle teollisuuteen. Yleisesti kaikkien talteen saatavien lopputuotteiden sisältämistä epäpuhtauksista on vähän tietoa saatavilla. Lietteen polttolaitoksissa orgaaniset haitta-aineet ja mikromuovit poistuvat.

Eri talteenottomenetelmille määritettiin saavutettavat kokonaistalteenottoasteet jätevedenpuhdistamolle tulevasta kuormituksesta, kun ensin oli laadittu fosforin ja typen massataseet tyypillisille jätevedenpuhdistamolle. Fosforin osalta korkein talteenottoaste saavutetaan lietteen polton ja märkäkemiallisen käsittelyn yhdistelmällä, jolloin saadaan myös korkealaatuista lopputuotetta. Yhdistelmällä voidaan saada talteen jopa 85 % jätevedenpuhdistamolle tulevasta fosforista. Polton etuna on, että samalla merkittävästä osasta liettemassaa päästään eroon ja jäljelle jää vain tuhka-ainetta, joka voi vaatia vielä jatkokäsittelyä ennen loppusijoitusta. Lainsäädäntö estää tällä hetkellä yhdyskuntajätevesituhkan käyttämisen lannoitteena metsissä ja pelloilla. Polton heikkoutena on, ettei lietteen sisältämää typpeä tai hiiltä saada talteen. Poltto on mahdollista toteuttaa energiaomavaraisesti ja muodostuvaa lämpöenergiaa voidaan optimitalanteessa johtaa esimerkiksi kaukolämpöverkkoon.

Tuhkan sisältämä fosfori voidaan erottaa siitä märkäkemiallisella käsittelyllä. Lisäksi voi olla mahdollista hyödyntää muita talteenottoprosesseissa muodostuvia jakeita esimerkiksi teollisuuden raaka-aineina. Lietteen poltto on hyvin tunnettu menetelmä maailmalla, mutta fosforin talteenotto tuhkasta ei ole vielä käytössä täydessä mittakaavassa Euroopassa. Ensimmäiset tuhkan märkäkemiallista menetelmää hyödyntävät laitokset ovat suunnitteilla ja rakenteilla Saksaan ja Ruotsiin.

Mädätys on Suomessa yleisin lietteen käsittelytapa. Tarkastellut typen talteenottomenetelmät, strippaus ja kalvomenetelmät, vaativat lietteen mädätyksen. Tyypillisesti mädätyksen rejektivesi johdetaan takaisin jätevedenpuhdistamolle, mikä lisää sen kuormitusta. Suomessa on kokemuksia täyden mittakaavan strippausprosesseista ja kalvotekniikkaan perustuvaa NPHarvest-menetelmää on pilotoitu. Typen talteenottoasteet näillä menetelmillä jätevedenpuhdistamolle tulevasta kuormasta ovat arviolta 9-10 % luokkaa. Molempien menetelmien lopputuote on hyvälaatuista ja niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitetuotannon raaka-aineena tai muualla teollisuudessa. Tietyissä tilanteissa lopputuotteet voisivat soveltua myös suoraan lannoitteiksi. Mädätejäännös voidaan nykyisin hyödyntää esimerkiksi viherrakentamiseen tai maatalouteen, mutta tulevaisuudessa sen jatkokäsittelyyn voi liittyä uusia vaatimuksia. Mädätejäännös voitaisiin käsitellä esimerkiksi pyrolyysiprosessilla tai polttamalla.

Struviitin saostus ja fosforin talteenotto vivianiittina vaativat, että liete käsitellään ensin mädättämällä. Tosin vivianiitin talteenottoa myös mädättämättömästä lietteestä tutkitaan tällä hetkellä.

Struviitin saostus on kannattavaa ainoastaan biologisissa fosforinpoistolaitoksissa, joissa fosforia ei saosteta kemiallisesti ennen jälkikäsittelyvaihetta. Struviitin saostus on koettua ja käytössä olevaa teknologiaa. Euroopassa on useita toiminnassa olevia täyden mittakaavan laitoksia struviitin talteenottoon. Suomessa väljästi mitoitetuilla jätevedenpuhdistamoilla on mahdollista ottaa käyttöön biologinen fosforinpoisto suhteellisen pienillä muutoksilla. Struviittisaostuksen talteenottoaste riippuu käsiteltävästä jakeesta, mädätyksen olosuhteista ja mahdollisesta esikäsittelystä. Talteenottoasteen arvioitiin olevan noin 25 % tulevasta fosforista. Myös muutama prosentti tulevasta tuestä saadaan talteen. Talteen saatava struviitti soveltuu suoraan lannoitteeksi, mikäli ravinnesuhteet käyttökohteelle ovat sopivat. Vastaavasti kuin typen talteenotto prosessien kohdalla, jäljelle jäävä mädätejäännös vaatii jatkokäsittelyä.

Vivianiitin talteenotto magneettisesti on vielä suhteellisen uusi pilotointivaiheessa oleva menetelmä. Sen lopputuotteena saadaan vivianiittilietettä, joka ei vielä sellaisenaan sovellu lannoitteeksi. Muodostunut lietejäte vaatii jatkokäsittelyä ja soveltuu raaka-aineeksi lannoiteteollisuuteen. Vivianiitin talteenoton etuna on, ettei se vaadi erillisiä kemikaaleja kemiallisella fosforinpoistolaitoksella, jossa saostuskemikaalina on käytössä rautasuola. Menetelmän talteenottoaste on jopa 60 % tulevasta fosforista. Vivianiittilietettä syntyy noin 10 % mädätejäännöksestä ja loppuosa johdetaan lietteen jatkokäsittelyyn. Mädätejäännöksen fosforipitoisuus alenee talteenoton ansiosta alle puoleen alkuperäisestä, mikä helpottaa jäännöksen hyödyntämistä orgaanisena maanparannusaineena.

RAVITA-prosessi on Suomessa kehitetty menetelmä, joka poikkeaa muista talteenottomenetelmistä. RAVITA on vielä kehitysvaiheessa ja se perustuu fosforin saostukseen puhdistamon jälkikäsittelyvaiheessa. Jotta saavutetaan mahdollisimman korkea talteenottoaste, on esi- ja rinnakkaissaostuksesta luovuttava. Jälkikäsittelyssä muodostuneesta kemiallisesta lietteestä uutetaan fosfori fosforihapolla, jolloin myös osa käytetystä saostuskemikaalista saadaan kierrätettyä takaisin jälkikäsittelyyn. Saavutettava talteenottoaste on arviolta jopa 50 % tulevasta fosforista. Lopputuotteena prosessista syntyy ylimääräistä fosforihappoa. Se soveltuu todennäköisesti raaka-aineeksi lannoitetuotantoon tai muualle teollisuuteen. Fosforihappoa voidaan käyttää myös strippausprosessissa, jos tyyppiä erotetaan lietteenkäsittelyn rejekteistä tällä tekniikalla.

Eri menetelmien kustannuksia arvioitiin asukasvastikeluvultaan 100 000 asukkaan jätevesikuormitusta vastaavaan kokoluokkaan. Kustannuksissa huomioitiin pääomakustannukset ja käyttökustannukset. Laskelmat perustuvat kustannustietoihin, jotka saatiin menetelmien kehittäjiltä, laitetoimittajilta ja kirjallisista lähteistä. Kustannuksissa huomioitiin myös jäljelle jäävän lietejakeen jatkokäsittelystä muodostuvat kulut. Muodostuvien tuotteiden myyntiarvoa tai niiden jatkokäsittelyn kustannuksia ei kuitenkaan huomioitu. On huomioitava, että menetelmien kustannuksiin liittyy paljon epävarmuuksia, ja erityisesti vielä kehitteillä olevien menetelmien todellisia kustannuksia on mahdoton arvioida tarkasti. Vertailukustannuksien tarkkuustaso on näin ollen luokkaa $\pm 50 \%$.

Struviittisaostus, vivianiitin erotus magneettisesti sekä poltto ja märkäkemiallinen fosforin talteenotto ovat fosforin talteenottomenetelmistä vertailuhintojen perusteella jokseenkin samalla tasolla. Tällä kustannustasolla on myös typen talteenotto haihdutuksen ja strippauksen yhdistelmällä. Suomessa kehitteillä olevat uudet tekniikat (NPHarvest ja RAVITA) näyttävät tällä hetkellä olevan vielä muita tekniikoita kalliimpia. Yleisesti voidaan todeta, että ravinteiden talteenotto aiheuttaa lisäkustannuksia ja toistaiseksi se ei näytä olevan kannattavaa liiketoimintaa ilman erillistä tukea ja ennustettavan pitkäkestoisen markkinanäkymän luontia lainsäädännön keinoin.

13. Lähteet

- Aalto-yliopisto. 22.6.2021. Ravinteiden talteenotto. <https://www.aalto.fi/fi/insinooritieteiden-korkeakoulu/ravinteiden-talteenotto>. Vierailtu 25.11.2022
- Aalto-yliopisto. 2021. Tiedote 9.2.2021: Jätevedestä lannoitteet nappaavaa tekniikkaa pilotoidaan Helsingborgin kiertotalouskaupunginosassa. Online: <https://www.stinfo.fi/tiedote/jatevedesta-lannoitteet-nappaavaa-tekniikkaa-pilotoidaan-helsingborgin-kiertotalouskaupunginosassa?publisherId=37936456&releasId=69900272> Vierailtu 18.1.2023
- Aalto-yliopisto. 2022. NPHarvest – Tulokset, päivitetty 22.8.2022. Online: <https://www.aalto.fi/fi/npharvest/tulokset/> Vierailtu 18.1.2023
- Adar, E., Ince, M. & Bilgili, M.S.2020. Characteristics of Liquid Products in Supercritical Water Gasification of Municipal Sewage Sludge by Continuous Flow Tubular Reactor. *Waste Biomass Valor* 11: 6321–6335. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00858-9>
- Anastasakis, K.; Biller, P.; Madsen, R.B.; Glasius, M.; Johannsen, I. 2018. Continuous Hydrothermal Liquefaction of Biomass in a Novel Pilot Plant with Heat Recovery and Hydraulic Oscillation. *Energies* 11. <https://doi.org/10.3390/en11102695>
- Andersson, Sofia Lovisa. 2021. Kväveåtervinning genom stripping och kristallisation. IVL Svenska Miljöinstitutet rapport B2412.
- Antonini S, Arias MA, Eichert T, Clemens J. 2012. Greenhouse evaluation and environmental impact assessment of different urine-derived struvite fertilizers as phosphorus sources for plants. *Chemosphere*. 89:1202-1210.
- Balsev. 2022. Gødning fra renselanlægs-fosfor er nu (tæt på at være) en positive business case. <https://www.kruger.dk/goedning-fra-renseanlaegs-fosfor-er-nu-taet-paa-vaere-en-positiv-business-case>
- Baltic Smart Water Hub. 2020. Piloting phosphorus recovery by RAVITA process. <https://www.balticwaterhub.net/innovation/ravita-process>
- Berninger. 2018. Puhdistamolieteselvitys.
- Blöcher Christoph, Niewersch Claudia, Melin Thomas. 2012. Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.022>.
- Caballero R., Pajuelo p., Ordovás J., Carmona E., Delgado A.. 2009. Evaluation and correction of nutrient availability to *Gerbera jamesonii* H. Bolus in various compost-based growing media. *Sci. Hortic.*, 122: 244-250. [10.1016/j.scienta.2009.05.010](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.010)
- Christian, S.J., Broeders, E. & Menkveld, H.W.H. 2016. Recovery of ammonia from digestate as fertilizer. *Proceedings of the Water Environment Federation. WEFTEC*. 932–937.
- Cohen Y. 2018. Ash2Phos –Clean commercial P products from sludge ash. 3rd European Nutrient Event at Ecomondo 2018. Saatavilla:

https://phosphorusplatform.eu/images/Conference/ESPP_Rimini_2018/Peesentations/COHEN_Yariv_EasyMining.pdf

Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global environmental change*, 19(2), 292-305.

de Santiago A., Delgado A. 2010. Interaction between beet vinasse and iron fertilisers in the prevention of iron deficiency in lupins. *J. Sci. Food Agric* 90: 2188-2194. 10.1002/jsfa.4068

de Santiago A., Carmona E., Quintero J.M., Delgado A. 2013. Effectiveness of mixtures of vivianite and organic materials in preventing iron chlorosis in strawberry. *Span. J. Agric. Res.*, 11: 208-216. 10.5424/sjar/2013111-2671

Domenico Rombolà A., Toselli M., Carpintero J., Ammari T., Quartieri M., Torrent J., Marangoni, B. 2003. Prevention of iron-deficiency induced chlorosis in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) through soil application of synthetic vivianite in a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 26: 2031-2041. 10.1081/PLN-120024262

DPP (Deutsche Phosphor Plattform). 2018. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung – nach der Kläranlage: EuPhoRe.

DPP (Deutsche Phosphor Plattform). 2019. Verfahren zur Phosphor-Rückgewinnung – nach der Kläranlage: AshDec.

Drunsel Florian. 2021. DRYING-GRINDING EXPERIMENTS. <https://flashphos-project.eu/app/uploads/D3.1-Drying-Grinding-experiments.pdf>

EasyMining. Ash2Phos. <https://www.easymining.se/technologies/ash2phos/>

Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522-542.

ESDAC. 2022. Soil nutrients. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/soil-nutrients>.

Escudero A., Reichelt, L.D., Pahl O. 2021. Technical report of the Phos4You partnership on processes to recover phosphorus from wastewater: Demonstrator I4: Microalgae to recover P from small-scale WWTPs

ESPP, DPP & NPP. 2022. ESPP – DPP – NNP nutrient recovery technology catalogue. <http://www.phosphorusplatform.eu/techcatalogue>. Vierailtu 1.2.2023

ESPP 2023. eNews n°73: European Biochar Industry (EBI) position paper on pyrolysis of sewage sludge. Saatavilla: https://phosphorusplatform.eu/scope-in-print/enews/2346-espp-enews-no-73-february-2023#_Toc127204245. Vierailtu 16.2.2023

EuPhoRe® GmbH. Vorteile des EuPhoRe®-Verfahrens. <https://www.euphore.de/> Vierailtu 1.2.2023

European Commission. 2019. What is the European Green Deal? Saatavilla: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6714

Euroopan komissio. (2013). Kuulemista koskeva tiedonanto fosforin kestävästä käytöstä. <https://ec.europa.eu/environment/consultations/pdf/phosphorus/FI.pdf>. Avattu 18.11.2022.

European Biochar Industry Consortium. 2023. Sewage Sludge as feedstock for pyrolysis to be included in the scope of the EU Fertilizing Products Regulation. https://www.biochar-industry.com/wp-content/uploads/2023/01/20230131_EBI_Sewage_Sludge_Position_Paper_final.pdf

Eynard A., Campillo M.C., Barrón V., Torrent J. 1992. Use of vivianite ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8(\text{H}_2\text{O})$) to prevent iron chlorosis in calcareous soils. *Fertil. Res.* 31: 61-67. 10.1007/BF01064228
Figueiredo M.O., Silva T.P., Veiga J.P. 2010. The blue of iron in mineral pigments: a Fe K-edge XANES study of vivianite. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 99 (2): 357–361. <https://doi.org/10.1007/s00339-010-5637-9>.

Fjäder, P. (2016). Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherrakentamisen riskit–RUSSOA I-III Loppuraportti.

Forrest AL, Fattah KP, Mavinic DS, Koch FA. 2008. Optimizing struvite production for phosphate recovery in WWTP. *J. Environ. Eng.* 134:395 402.

Gasum Oy. 11.05.2021, päivitetty 10.3.2022. Jätevesilietteiden ravinteet keskittäen kiertoon. <https://www.gasum.com/gasum-yrityksena/medialle/uutiset/2021/jatevesilietteiden-ravinteet-keskittaen-kiertoon/> Vierailtu 23.1.2023

Grönfors Outi, Cazalet Damien, Vuori Vesa, Nguyen Ha, Prot Thomas, Haarala Anna and Hansen Bengt. Experiences from Phosphorus Recovery Trials with the ViviMag® Technology

Gutiérrez Ortiz, F.J. 2022. Biofuel production from supercritical water gasification of sustainable biomass, *Energy Conversion and Management: X.* <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100164>.

Halinen. 2022. Raki-hankkeet webinaari 7.10.2022: Huittisten Puhdistamo Oy, Fosforin saostus struviittina.

HAMK 2022. <https://www.hamk.fi/projektit/jarkki/#materiaalit>

Heckenmüller, M., Narita, D., & Klepper, G. (2014). Global availability of phosphorus and its implications for global food supply: an economic overview (No. 1897). Kiel working paper.

HELCOM (2018), Overview of nutrient recycling in the Baltic Sea countries).

HSY 2017. Koekohde ravinteiden talteenottoon jätevedestä ja lietteenkuivauksen rejektistä.

HSY. 2021. Esitys: HSY:n lietehiilihanke ja pyrolyysin pilot-laitos, Aino Kainulainen. <https://docplayer.fi/214184950-Aino-kainulainen-hsy-n-lietehiilihanke-ja-pyrolyysin-pilot-laitos-10-min-hankepaallikko-hsy-n-jatehuollon-tutkimus-ja-kehitys.html>

HSY. 14.12.2022. Jäteveden tärkeät ravinteet ja hiili kiertoon uusin menetelmin. <https://www.stinfo.fi/tiedote/jateveden-tarkeat-ravinteet-ja-hiili-kiertoon-uusin-menetelmin?publisherId=4346&releaseId=69960139> Vierailtu 23.1.2023

HSY. RAVITA – Ajankohtaista. Online: <https://www.hsy.fi/ravita/hankkeet/> Vierailtu 17.1.2023

HSY. RAVITA – Prosessi. Online: <https://www.hsy.fi/ravita/prosessi/> Vierailtu 17.1.2023

HSY 2023. HSY mukana Helsinki Biochar Project –hankkeessa. Tiedote, julkaistu 23.1.2023 päivitetty 25.1.2023. Saatavilla: <https://www.hsy.fi/ymparistotieto/tiedotteet/hsy-mukana-helsinki-biochar-project-hankkeessa/>

Humphreys, J., Lan, R., & Tao, S. (2021). Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1), 2000043.

Ibrahim, A.B.A., Akilli, H. 2019. Supercritical water gasification of wastewater sludge for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.184>.

IFA (International Fertilizer Association) 2022. Reducing emissions from fertilizer use.

Ikonen Päivi. 2023. Ravita-menetelmä hyödyntää tehokkaasti jäteveden fosforin ja hiilen. Artikeli julkaistu 5.1.2023 Uusi-uutisissa. Saatavilla: <https://www.uusi-uutiset.fi/ravita-menetelma-hyodyntaa-tehokkaasti-jateveden-fosforin-ja-hiilen/>

Kabbe Christian. 2019. Global Compendium on Phosphorus Recovery from Sewage/Sludge/Ash. Global Water Research Coalition. Kompetenzzentrum Wasser Berlin (Germany) and P-REX® Environment (Germany).

Kabbe C. 2023. Inventory of phosphorus “recovery and /or recycling” facilities operating or under construction at or downstream of wastewater treatment installations. Saatavilla: https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2023-01-04.pdf

Kaljunen Juho Uz Kurt. 22.6.2022. PERM5 Conference presentation: NPHarvest Calcium based P recovery process as a pre-treatment for N recovery

Kaljunen Juho Uz Kurt, Al-Juboori Read A., Mikola Anna, Righetto Ilari & Konola Irene. 2021. Newly developed membrane contactor-based N and P recovery process: Pilot-scale field experiments and cost analysis. *Journal of Cleaner Production* 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125288>

Kemira Oyj. 2022 a. Press Release 16.6.2022: Kemira and Veolia announce joint collaboration in new phosphorus recovery technology. Online: [kemira.com/company/media/newsroom/releases/kemira-and-veolia-announce-joint-collaboration-in-new-phosphorus-recovery-technology/](https://www.kemira.com/company/media/newsroom/releases/kemira-and-veolia-announce-joint-collaboration-in-new-phosphorus-recovery-technology/) Vierailtu 12.1.2023

Kemira Oyj. 2022b. Article 18.10.2022: Award-winning breakthrough in phosphorus recovery. Online: <https://www.kemira.com/insights/award-winning-breakthrough-in-phosphorus-recovery/> Vierailtu 12.1.2023

Kemira Oyj. 2023. Esitys: ViviMag® Phosphorus recovery, Outi Grönfors.

Kinnunen, Viljami (Gasum). 2019. Biogas process for enhancing nutrient recovery in centralized sludge treatment. Lieteresurssi tänään ja huomenna - 28.11.2019

Klein D., Schmelz K.G., Pamuk L., Teichgräber B., Zepke F. 2021. Technical report of the Phos4You partnership on processes to recover phosphorus from wastewater: Demonstrator I1: Thermochemical solution to recover P from sewage sludge (EuPhoRe®)

Korving, Leon & Hansen Bengt. 21.6.2022. ESPC4 Conference presentation: ViviMag – A successful public/private research collaboration to recover iron and phosphate from sewage sludge.

Lantmännen. 2023. <https://kauppa.lantmannenagro.fi/tuotekatalogi/lannoitteet-48333/peltolannoitteet-50134>. Vierailtu: 17.3.2023

Latifian M, Liu J, Mattiasson B. 2012. Struvite-based fertilizer and its physical and chemical properties. Environ. Technol. 33:2691-2697.

Lehtoranta, S., Malila, R., Fjäder, P., Laukka, V., Mustajoki, J., & Äystö, L. (2021). Jätevesien ravinteet kiertoon turvallisesti ja tehokkaasti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 18/2021.

Lemola, R., Uusitalo, R., Luostarinen, S., Tampio, E., Laakso, J., Lehtonen, E., Skyttä, A. & Turtola, E. 2023. Fosforin kierrätyksen tarve ja potentiaali kasvintuotannossa : Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 10/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 56 s.

Levlin Erik. 2001. Recovery of phosphate from sewage sludge and separation of metals by ion exchange.

Leväsieppari 2020. Leväsieppari – Ravinteet talteen ja kiertoon luonnonmukaisesti (LeväRaki). Loppuraportti. https://www.vanajavesi.fi/2018/wp-content/uploads/2020/05/LOPPURAPORTTI_31.3.2020.pdf

Li C. & Sheng Y. 2021. Organic matter affects phosphorus recovery during vivianite crystallization. Water Sci Technol 83 (8): 2038–2050. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.112>

LIFE RE-Fertilize. 2023. Removal and recovery of nitrogen with the Aqua2@N-process demonstrated. https://www.easymining.se/globalassets/easymining/dokument/prj16-life_re-fertilize-v4.pdf

LUKE 2022a. Luonnonvarakeskus – Tilastopalvelu. Typpi- ja fosforitaseen (kg/ha) kehitys ELY-keskuksittain. Vierailtu 18.11.2022.

LUKE 2022b. Luonnonvarakeskus – Tilastopalvelu: Luonnonvarakeskus / Kemira Agro Oy/Yara Suomi Oy, lannoitteiden tuontiyhtykset, Evira; SVT: Luke Kasviravinteiden myynti maataloille. Vierailtu 18.11.2022.

LUKE 2022d. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/ravinteiden-kierratys-saa-vauhtia>

LUKE 2023. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Fosforin kierrätyksen tarve ja potentiaali kasvintuotannossa. Lemola R., Uusitalo R., Luostarinen S., Tampio E., Laakso J., Lehtonen E., Skyttä A., Turtola E. https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/553083/luke-luobio_10_2023.pdf?sequence=8&isAllowed=y . Vierailtu 20.2.2023.

Maa- ja metsätalousministeriö 2023. Lannoitevalmisteet. <https://mmm.fi/elaimet-kasvit/lannoitevalmisteet>. Avattu 7.1.2023

Maa- ja metsätalousministeriö. End-of-Waste EU:n lannoitevalmisteasetuksessa, Titta Berlin 10.2.2020. Avattu 16.1.2023.

Malovanyy A., Johannesdottir S., Schwede S., Ahlgren S., Flodin E., Shanmugam K. 2022. Återvinning av näringsämnen från avlopp. En litteraturstudie. SVU-rapport 2022-6. Stockholm, Svenkst Vatten

Matayeva Aisha, Rasmussen Stephanie R., Biller Patrick. 2022. Distribution of nutrients and phosphorus recovery in hydrothermal liquefaction of waste streams, *Biomass and Bioenergy* 156. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106323>.

Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., ... & zu Castell-Rüdenhausen, M. (2017). Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa: Nykytila ja suositukset ohjaukskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus. Luke 2017.

Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2021). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18773-w>. Luettu 18.11.2022.

MTK 2017. Ravinteiden käyttö ja maan kasvukunnon hoito. <https://www.mtk.fi/-/ravinteiden-kaytto-ja-maan-kasvukunnon-hoito>. Avattu 18.11.2022.

Munir M.T., Li B., Mardon I., Young B.R., Baroutian S. 2019. Integrating wet oxidation and struvite precipitation for sewage sludge treatment and phosphorus recovery. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.007>.

Peltola Petteri, Ruottu Lauri, Larkimo Markus, Laasonen Arttu, Myöhänen Kari. 2023. A novel dual circulating fluidized bed technology for thermal treatment of municipal sewage sludge with recovery of nutrients and energy. *Waste Management* 155: 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.017>

Pihl T. 2017. Recovery and reuse of phosphorus from municipal wastewater – applications and attitudes in Finland.

Pinnekamp, J., Everding, W., Gethke, K., Montag, D., Weinfurter, K., Sartorius, C. et al. 2011. Phosphorrecycling – Ökologische und Wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines Strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe). *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser*. Bundesministerium für Bildung und Forschung.

P-REX. 2015. Technical Factsheet.

Priambodo R., Shih Y.J., Huang Y.H. 2017. Phosphorus recovery as ferrous phosphate (vivianite) from wastewater produced in manufacture of thin film transistor-liquid crystal displays (TFT-LCD) by a fluidized bed crystallizer (FBC). *RSC Adv.*, 7, 40819. <https://doi.org/10.1039/c7ra06308c>

ProAgria Keskusten Liitto. (2016). Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. https://www.proagria.fi/uploads/archive/attachment/puhdistamolieteteopas_2020_linkit_1.pdf. Avattu 20.11.2022.

Prot T., Wijdeveld W., Ekuu Eshun L., Dugulan A.I., Goubitz K., Korving L., van Loosdrecht M.C.M. 2020. Full-scale increased iron dosage to stimulate the formation of vivianite and its recovery from digested sewage sludge. *Water Research* 182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115911>.

Prot T., Korving L., Dugulan A.I., Goubitz K., van Loosdrecht, M.C.M. 2021. Vivianite scaling in wastewater treatment plants: occurrence, formation mechanisms and mitigation solutions. *Water Res.*, 197, Article 117045, [10.1016/j.watres.2021.117045](https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117045)

- Prot T., Pannekoek W., Belloni C., Dugulan A.I., Hendriks R., Korving L., van Loosdrecht M.C.M. 2022. Efficient formation of vivianite without anaerobic digester: Study in excess activated sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 10, Issue 3. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107473>.
- Prot T., Nguyen V.H., Wilfert P., Dugulan A.I., Goubitz K., De Ridder D.J., Korving L., Rem P., Bouderbala A., Witkamp G.J., van Loosdrecht M.C.M. 2019. Magnetic separation and characterization of vivianite from digested sewage sludge. *Sep. Purif. Technol.* 224: 564-579. [10.1016/j.seppur.2019.05.057](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.057)
- Ray Hannah, Perreault Francois, and Boyer Treavor H. 2020. Ammonia Recovery from Hydrolyzed Human Urine by Forward Osmosis with Acidified Draw Solution. *Environmental Science & Technology* 54 (18): 11556-11565. DOI: [10.1021/acs.est.0c02751](https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02751)
- Recktenwald M., Karlsson I. 2003. Recovery of wastewater sludge components by acid hydrolysis. <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20407918>
- Reeves D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. 1997. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719879700038X>. Luettu 18.11.2022.
- RE-maatila. Ravinteet. Sanna Söderlund, Baltic Sea Action Group <http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/omalannoitteet/ravinteet/>. Avattu 18.11.2022.
- REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG. 2018. Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche – Das Remondis TetraPhos®-Verfahren. <https://slideplayer.org/slide/17568009/>
- REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG (2021): TetraPhos® process applied to NL and DE sewage sludge ashes. Comparative analysis. Phos4You final conference - Phosphorus recovery from wastewater: approaches developed within Phos4You. Essen, RuhrTurm and online, 9/22/2021. Saatavilla: https://www.nweurope.eu/media/15011/phos4you_108_rak_remondis.pdf.
- Rosado R., Del Campillo M.C., Martínez M.A., Barrón V., Torrent J. 2002. Long-term effectiveness of vivianite in reducing iron chlorosis in olive trees. *Plant Soil* 241: 139-144. [10.1023/A:1016058713291](https://doi.org/10.1023/A:1016058713291)
- Ruokavirasto (2022a). Jätevesilietteiden käyttö lannoitevalmisteena. <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/jatevesilietteet/>. Avattu 29.11.2022.
- Ruokavirasto (2022b). Kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yriytykset/lannoiteala/tiedostot/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf. Avattu 29.11.2022.
- Ruokavirasto (2022c). Lannoitevalmisteiden valmistus Suomessa vuosittain. Vierailtu 17.11.2022.
- Ruokavirasto (2022d). Jätevesilietteiden käyttö lannoitevalmisteena. <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratysravinteet/jatevesilietteet/> Sivu päivitetty: 10.10.2022 Vierailtu 2.2.2023
- Römer, W. 2013. Phosphordüngewirkung neuer Phosphorrecyclingprodukte. *Berichte aus der Landwirtschaft*, 91:1-24

SAR Electronic GmbH. 2020. Dismantling of a pilot plant and upcycling of components. https://www.sar.biz/news/2020_Mephrec_e.asp Vierailtu 2.3.2023

Saud, A., Havukainen, J., Peltola, P., Horttanainen, M. (2021). Integrating Pyrolysis or Combustion with Scrubbing to Maximize the Nutrient and Energy Recovery from Municipal Sewage Sludge. *Recycling*, vol. 6, issue 3. DOI: 10.3390/recycling6030052

Schaum, C., Cornel, P., & Norbert, J. (2007). Phosphorus Recovery from Sewage Sludge Ash - A Wet Chemical Approach.

Schmelz, Karl-Georg. 2019. Phos4You: Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm.

https://www.youtube.com/watch?v=Wjh_Umw4xRs&ab_channel=EGLVEmschergenossenschaft%2FLippeverband

Vierailtu 1.2.2023

Schmidberger C., Schmid M., Kopper K. 2021. CONCEPTUAL ENGINEERING. <https://flashphos-project.eu/app/uploads/D4.1-Conceptual-Engineering.pdf>

Sitra. 2020. Polkuja tavoitteelliseen kestävyys-raportointiin. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2020/05/polkuja-tavoitteelliseen-kestavyysraportointiin.pdf>

Smil, V. 1999. Nitrogen in Crop Production: An Account of Global Flows. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 647-662. <https://doi.org/10.1029/1999GB900015>

Stendahl, K. Järfverström, S. 2004. Recycling of sludge with the Aqua Reci process. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research* 49 10: 233-40 .

SYKE 2022a Policy Brief: Jätevesien ravinteet hyötykäyttöön. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/syke-policy-brief-jatevesien-ravinteet-hyotykayttoon?publisherId=69819243&releaseId=69958961>

SYKE 2022b. Yhdyskuntien jätevesien kuormitus vesiin. Julkaistu 15.2.2018, päivitetty 13.9.2022.

https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kartat_ja_tilastot/Vesihuolto raportit/Yhdyskuntien_jatevesien_kuormitus_vesiin
Vierailtu 3.1.2023

Thomsen Silva LB, Carvalho PN, Dos Passos JS, Anastasakis K, Bester K, Biller P. 2020. Hydrothermal liquefaction of sewage sludge; energy considerations and fate of micropollutants during pilot scale processing. *Water Res.* 15. doi: 10.1016/j.watres.2020.116101.

Valtari Maria. 2022. Raki-hankkeet webinaariesitelmä 7.10.2022: RAHI Jätevesien ravinteiden ja hiilen kokonaisvaltainen talteenotto

Valtioneuvosto. 2020. Kansallisen Agenda2030 tiekartan laadinta.

<https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=VNK128:00/2020>

Veolia Deutschland. 2023. Youtube-video: Kemira ViviMag® phosphorus recovery.

https://www.youtube.com/watch?v=CHO0ml6buzU&ab_channel=VeoliaDeutschland

Vieno, N. 2014. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla –hankkeen loppuraportti. Vesilaitosyhdistys, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 34. <https://www.vvy.fi/haitta-aineselvytys>. [Vierailtu 18.2.2021]

Viherympäristöliitto ry:n lausunto fosforiasetuksesta. 17.8.2022.

<https://mmm.fi/hanke2?tunnus=MMM031:00/2021> [Vierailtu 16.2.2023]

Vilpanen, M., Seppälä P. 2021. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus

Vesilaitosyhdistys, Helsinki. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 71.

https://www.vvy.fi/site/assets/files/4691/yhdyskuntalietteen_kasittelyn_ja_hyodyntamisen_nykytilannekatsaus_2021.pdf [Vierailtu 18.11.2022]

Volpin Federico, Huijin Heo, Md Abu Hasan Johir, Jaeweon Cho, Sherub Phuntsho, Ho Kyong Shon. 2019.

Techno-economic feasibility of recovering phosphorus, nitrogen and water from dilute human urine via forward osmosis. *Water Research* 150: 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.056>.

World Bank 2023. Commodity markets. <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>

Wijdeveld W.K., Prot T., Sudintas G., Kuntke P., Korving L., van Loosdrecht M.C.M.. 2022. Pilot-scale

magnetic recovery of vivianite from digested sewage sludge. *Water Research* 212.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118131>.

Wilfert P., Korving L., Dugulan I., Goubitz K., Witkamp G.J., van Loosdrecht M.C.M. 2018. Vivianite as the

main phosphate mineral in digested sewage sludge and its role for phosphate recovery. *Water Res.*, 144: 312-321

Wupperverband. Internetsivu: <https://www.wupperverband.de/unsere-anlagen/klaeranlagen/klaeranlage-kohlfurth> Vierailtu 23.1.2023

USGS 2021. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-phosphate.pdf>

Ympäristöministeriön raportteja 9/2018: Jätteen luokittelun päättymisen hyödyt ja haitat.

https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160560/YMra_9_2018.pdf

Yle 2021. <https://yle.fi/a/3-12443108>

Zhao Yali, Gwo Sung Lai, Can Li, Rong Wang. 2023. Acid-resistant polyamine hollow fiber nanofiltration

membrane for selective separation of heavy metals and phosphorus. *Chemical Engineering Journal*. Volume.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139825>