



KAATOPAIKKAVESIEN RAVINTEIDEN TALTEENOTTO JA KIERRÄTYS

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Kemiantekniikan kandidaatintyö

2022

Teo Virta

Tarkastaja: Tutkijatohtori Miia John

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT Teknis-luonnontieteellinen
Kemiantekniikka

Teo Virta

Kaatopaikkavesien ravinteiden talteenotto ja kierrätys

Kemiantekniikan kandidaatintyö
43sivua, 5 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite
Tarkastaja: Tutkijatohtori Miia John

Avainsanat: Haitta-aineet, jäteveden käsittelytekniikat, kaatopaikkavesi, ravinteet, suotovesi, talteenotto

Tämän työn tarkoituksena on selvittää kaatopaikkavesien hallinnan tilannetta Suomessa ja jätevedenkäsittelytekniikoiden soveltuvuus kaatopaikkavesiin sekä ravinteiden talteenottomahdollisuudet. Työ oli kirjallisuuskatsaus ja Suomen tilannetta kartoitettiin ympäristölupien ja yrityksien vuosikertomuksien pohjalta.

Erilliskäsittely kaatopaikkavesiin on vähäistä Suomessa ja ravinteiden talteenotto vielä harvinaisempaa. Yleisimmät Suomessa käytössä olevat erilliskäsittelytekniikat ovat RO-suodatus ja suotoveden kierrätys. Useimmiten kaatopaikkavesiä pumpataan lähimmälle jätevedenpuhdistamolle yhteiskäsittelyyn talousjäteveden kanssa.

Pitkäaikaisimmat epäpuhtaudet kaatopaikkavesissä ovat COD ja ammoniumtyppi ja haitallisimmat ovat ksenobioottiset yhdisteet sekä raskasmetallit. Kaatopaikkavesien käsittelytekniikoiden soveltuvuuden arvioinnin kannalta kaatopaikan ikä on tärkeä mittari, kertoen kaatopaikan hajoamisvaiheesta ja näin ollen suotoveden koostumuksesta ja haitta-aine pitoisuuksista. Useat uudemmat tekniikat keskittyvät vanhojen kaatopaikkojen suotovesien käsittelyyn, koska tyyppillinen biologinen käsittely soveltuu huonosti vanhojen kaatopaikkojen suotovesien käsittelyyn.

Ravinteiden talteenottoa tapahtuu biologisen käsittelyn lietteen hyödyntämisenä jatkokäsittelyn jälkeen. Ravinteiden talteenotto tarvitsee usein oman prosessin eikä tapahdu puhdistusprosessin sivutuotteena. Tämän vuoksi ravinteiden talteenottotekniikat ovat toissijainen prioriteetti puhdistusmenetelmien valinnassa, eikä näin ollen käytännön toteutuksia ole paljoakaan.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

1	Johdanto.....	4
2	Kaatopaikkavesien hallinta Suomessa.....	5
2.1	Lainsäädäntö	5
2.2	Erilliskäsittely ja yhteiskäsittely Suomessa	6
2.3	Ekokymppi.....	12
3	Kaatopaikkavesien karakterisointi.....	13
3.1	Kaatopaikkojen jaottelu	13
3.2	Haitta-aineet.....	17
4	Käsittelymenetelmät	19
4.1	Fysikaaliset menetelmät.....	19
4.2	Kemialliset menetelmät	22
4.3	Sähkökemialliset menetelmät	24
4.4	Biologiset menetelmät	25
4.4.1	Aktiivilieteprosessit	26
4.4.2	Kantoaineprosessit	26
4.5	Yhdistetyt menetelmät	27
4.6	Tekniikoiden soveltuvuus kaatopaikkavesien käsittelyyn	30
5	Johtopäätökset	32
	Lähteet	35

Liitteet

Liite 1: Valtioneuvoksen asetus 2014/713 pilaantumista aiheuttavat aineet

1 Johdanto

Kaatopaikoilla jätevettä syntyy jätteiden käsittelyssä sekä jätetäyttöjen läpi imeytyvistä sadevesistä eli suotovesistä, molemmissa tapauksissa jätevedet eli yleisesti kutsutut kaatopaikkavedet sisältävät korkeita määriä ravinteita (Vieno Niina, 2014). Kaatopaikkavedet luokitellaan jätevedeksi ja tulee näin ollen kerätä puhdistukseen sekä pyrkiä minimoida niiden määrä. Kaatopaikkavesien ravinteiden talteenottoa vaikeuttaa laaja spektri haitta-aineita, epäsäännöllinen vesimäärä johtuen sadannasta sekä kaatopaikan iän myötä vaihteleva koostumus. Metallien talteenoton kannattavuutta taas estää pieni metallipitoisuus. (Kaartinen, Eskola, Vestola, Merta ja Mroueh, 2009; Pelkonen Markku, 2006)

Kiertotalous ja resurssitehokkuus ovat kasvavia teemoja teollisuudessa, varsinkin jätehuoltosektorilla. Suomessa jätevedenkäsittely ei ole suunniteltu ravinteiden talteenottoa varten ja näin ollen uusia tekniikoita kaivataan jätehuoltosektorille. (Lehtoranta, Malila, Fjäder, Laukka, Mustajoki ja Äystö, 2021). Ravinteiden talteenottoa ja uusien puhdistusmenetelmien kehittymistä kiihdyttää useissa maissa kiristynyt lainsäädäntö luontoon laskettaville vesille, sekä vähenevät luonnonvarat.

Kaatopaikat voivat olla merkittävä kuormituksen aiheuttaja kunnalliselle jätevedenpuhdistamolle, sillä riippuen sadannasta suotovettä voi syntyä suuria määriä. Suurimman määrän suotovettä tuottavat aktiiviset kaatopaikat eli avoimet jätetäytöt, kun taas suljetut kaatopaikat pintarakenteista riippuen tuottavat suotovettä noin 30 prosenttia sadannasta. Kiristyneiden tavanomaisen jätteen kaatopaikan säännöksistä johtuen Suomessa yhdyskuntajätettä sijoitettiin vuonna 2020 vain 0,5 % kaatopaikalle. Vaikka kaatopaikkojen käyttö on vähentynytkin radikaalisti viime vuosikymmenellä, tulee suotovesiä kerätä talteen suljetuiltakin kaatopaikoilta, jotka tuottavat vielä haitallisia vesiä useita vuosikymmeniä. (Pelkonen, 2006; Tilastokeskus, 2020)

Tämän tutkimustyön tavoitteena on selvittää kaatopaikkavesien käsittelyn ja ravinteiden talteenoton tilannetta Suomessa ja tutkia paikallisen käsittelyn hyötyjä verrattuna

kunnalliseen jätevesipuhdistamoon. Työssä käsitellään nykyisten sekä uusien jätevedenkäsittelytekniikoiden soveltuvuutta kaatopaikkavesien puhdistukseen ja mitkä olemassa olevat teknologiat mahdollistavat ravinteiden talteenottoa tai kierrätystä. Työssä käydään läpi Suomen kaatopaikkavesien hallinnan tilannetta tekniseltä kannalta. Työssä tuodaan myös uusia tekniikoita esille ja niiden soveltuvuutta kaatopaikkavesiin.

2 Kaatopaikkavesien hallinta Suomessa

Tässä luvussa käsitellään kaatopaikkavesien hallinnan tilannetta Suomessa sekä sitä ohjaavaa lainsäädäntöä. Luvussa tarkastellaan myös Suomessa käytössä olevia tekniikoita ja erilliskäsittelyn osuutta kunnallisilla kaatopaikoilla. Luvussa keskitytään kunnallisiin tavanomaisen jätteen kaatopaikkoihin.

2.1 Lainsäädäntö

Kaatopaikkavesien hallintaa ohjaa jätelaki 646/2011 ja ympäristönsuojelulaki 527/2014, myös jätevesien päästöraja-arvoja on määritelty ympäristöön johdettaville vesille. Kuitenkaan tarkkoja raja-arvoja muualle käsittelyyn johdettaville vesille ei ole laissa määritelty vaan valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 2013/331 § 5 mukaan kaatopaikkavedet eivät saa heikentää jätevedenpuhdistamon toimintaa tai syntyvän lietteen laatua ja vesihuoltolaitoksilla on oikeus kieltäytyä puhdistamasta vesiä, mikäli se aiheuttaa haittaa puhdistamolle.

Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 2014/713 §42 mukaan ympäristöluvassa tulee määritellä raja-arvot, mikäli jätevesi sisältää liitteessä 1 esitettyjä aineita. Yleisesti kaatopaikkojen jäteveden raja-arvot sovitaan tarkemmin jätevesisopimuksessa kaatopaikan ja jätevedenpuhdistamon välillä. Suomen lainsäädäntö mahdollistaa kaatopaikoille jäteveden muualle pumppaamisen, vaikka kunnalliset jätevedenpuhdistamot eivät ole suunniteltu kaatopaikkavesien käsittelyyn. Lainsäädännöllä voidaan vaikuttaa jäteveden

hallintaan ja ohjata erilliskäsittelyyn, kuten Saksassa. Erilliskäsittelyn yleistyessä valmiustaso ravinteiden talteenottoa varten paranee. (Kaartinen et al. , 2009)

Kaatopaikkavesien haitta-ainepitoisuuksia tulee seurata säännöllisesti niin aktiivisilla kuin suljetuilla kaatopaikoilla ja tarpeen mukaan käsitellä vedet niin ettei jätevedenpuhdistamolle aiheudu haittaa kaatopaikkavesistä. Tästä syystä useilla kaatopaikoilla on esikäsittely mahdollisuus tai vähintäänkin tasausaltaita kuormituksen tasaamiseksi.

2.2 Erilliskäsittely ja yhteiskäsittely Suomessa

Suomessa kaatopaikat sijoittuvat useasti jätekeskuksien yhteyteen, missä lajitellaan ja käsitellään useita erityyppisiä jätelajikkeita. Tästä syystä Suomen kaatopaikkavesiin lukeutuu hyvin erilaisia jätevesiä, joista väkevät ja laimeat vedet tulee pitää toisistaan erillään. Väkeviä vesiä ovat suotovedet vaarallisen ja tavanomaisen jätteen kaatopaikoilta, pilaantuneiden maiden käsittelyvedet sekä vaarallisen jätteen käsittelyvedet. Laimeita vesiä syntyy jätteenkäsittelykentiltä ja hulevesistä. Laimeat vedet voidaan usein johtaa suoraan luontoon tai kevyen puhdistuksen jälkeen riippuen haitta-ainepitoisuuksista. Väkevät vedet tulee käsitellä asianmukaisesti ennen luontoon päästämistä. Yleisin vesienhallinta ratkaisu väkeville vesille on pumppaaminen jätevedenpuhdistamolle, mikä voi olla haastavaa kaatopaikkavesien epäsäännöllisen määrän ja laadun vuoksi. Näistä syistä lähes kaikilla jätekeskuksilla on vähintään yksi tasausallas väkeville vesille tasoittamaan kuormitusta. Tämän kappaleen tiedot ovat kerätty ympäristöluvista sekä toiminnanharjoittajien vuosikertomuksista.

Erilliskäsittely ei ole yleinen menettely kaatopaikkavesien puhdistukseen ja näin ollen kaatopaikkavesien ravinteiden talteenotto on hyvin vähäistä. Kunnalliset jätevedenpuhdistamot käyttävät pääsääntöisesti aktiivilieteprosessia, jossa ravinteet kerääntyvät lietteeseen ja jatkavat kiertoaan lietteen mukana, mutta erillistä ravinteiden talteenottoa kaatopaikkavesille ei juurikaan ole käytössä. Kuvassa 1 on esitettyä 31:n suomalaisen jätehuoltoyhtiön jätekeskuksen vesienhallinnan tilanne ja erilliskäsittelytekniikat on esitettyä taulukossa I. Taulukon I tiedot eivät välttämättä kuvasta nykypäivän tilannetta, sillä ympäristöluvut eivät välttämättä sisällä ajantasaista tietoa teknisistä ratkaisuista.

Kaatopaikkavesien kuormitusvaihteluiden vuoksi on usein ympäristöluvissa määrätty mahdollisuus kaatopaikkavesien esikäsittelyyn. Vaikka pääsääntöinen käsittely olisi jätevedenpuhdistamolle pumppaaminen, esikäsittelyn mahdollisuus on usein tarpeellinen, ettei kaatopaikkavedet aiheuta haittaa jätevedenpuhdistamon prosessille.



Kuva 1 Jätekeskuksien kaatopaikkavesien käsittelymenetelmät Suomessa, punaisella merkityt tarkoittavat erilliskäsittelyä paikan päällä, sinisellä pelkästään jätevedenpuhdistamolle pumpausta ja keltaisella erilliskäsittelyn tai esikäsittelyn mahdollisuutta tarvittaessa. (Google my map)

Taulukko 1 Taulukossa 1 tarkennettu suomen kunnallisten kaatopaikkojen vesienhallinta menetelmiä ja esitetty kaatopaikkavesien määrä.

Yhtiö (Lähde)	Erilliskäsittely	Esikäsittely	Suotovesi kierrätys	Vesimäärä vuodessa
Botniarosk Oy (Botniarosk, 2020)	-	Tasausaltaat	Ei tietoa	8 770 m ³ , (2020)
Ab Ekorosk Oy Pirilö (LSSAVI/7129/2017) (LSSAVI/16619/2020)	-	Tarvittaessa kemiallinen saostus fosforille tasausaltaassa	-	Ei tietoa
Etelä-Karjalan Jätehuolto Oy (ESAVI/4406/2016) (Etelä-Karjalan jätehuolto, 2020)	-	Tasausallas yhdessä biokaasulaitoksen kanssa	-	89 618 m ³ , (2020)
Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY (ESAVI/13736/2020) (HSY, 2020)	Pintavesiä käsitellään RO suodatuksella (107 699 m ³ v.2020)	Tasausaltaat, Kalsiumnitraatti pohjainen kemikaali rikkivedyn estämiseksi	On tarpeiden mukaan	796 850 m ³ , (2020)
Jämsän kaupunki jätehuolto {LSSAVI/9220/2020}	-	Tasausaltaat	Ei tietoa	Ei tietoa
Jätekkukko Oy (ISAVI/9640/2020) (Jätekkukko, 2020)	-	Tasausaltaat	Ei tietoa	132 529 m ³ , (2020)
Kainuun jätehuollon kuntayhtymä Ekokymppi (PSAVI/130/04.08/2013) (PSAVI/00747/17/5107) (Ekokymppi, 2020)	Kiintoaines ja saostus lietteenä pois -> selkeytys - > zeoliitti- ioninvaihto suodatin-> Anoksinen vaihe	Tasausaltaat (Saostus ja kiintoaineenpoisto)	On tarpeiden mukaan	52 000 m ³ , (2020)
Keski-Savon jätehuolto liikelaitoskuntayhtymä (ISAVI/9091/2020) (ISAVI/5519/2020)	-	Öljynerotus kaivo vaaralliset jätteet, Tasausaltaat kaikille ja mahdollinen reaktiivinen suodatus tai saostus- laskeutus tarpeen vaatiessa	On tarpeiden mukaan	51 784 m ³ , (2019)
Kiertokaari Oy (PSAVI/2512/2018) (Kiertokaari, 2020)	-	Tasausaltaat	On tarpeiden mukaan	205 000 m ³ , (2020)
Kiertokapula Oy (ESAVI/31154/2021) (ESAVI/29612/2021) (Kiertokapula, 2020)	-	Tasausaltaat ja kokeilussa bio- ja lietehiili hiekkasuodatus	-	76 596 m ³ , (2020)
Kymenlaakson Jäte Oy (ESAVI/19264/2021) (Kymenlaakson jäte, 2020)	-	Tasausaltaat ja fosforin saostus (oma aktiivilieteprosessi)	Ei tietoa	84 269 m ³ , (2020)
Lakeuden Etappi Oy (LSSAVI/5512/2020) (Lakeuden etappi, 2020)	-	Tasausaltaat	-	130 790 m ³ , (2020)

Yhtiö	Erilliskäsittely	Esikäsittely	Suotovesi kierrätys	Vesimäärä vuodessa
Loimi-Hämeen jätehuolto LHJ Oy Kiimassuon (ESAVI/35344/2021) (LHJ, 2020b)	-	Ei tietoa	Ei tietoa	141 672 m ³ , (2020)
Lounais-Suomen jätehuolto Oy Topinoja (ESAVI/1278/2020) (Lounais-Suomen jätehuolto, 2020)	-	Ei tietoa	Ei tietoa	163 976 m ³ , (2020)
Metsäsairila Oy (ISAVI/970/2017) (Metsäsairila, 2020)	-	Tasausallas	Ei tietoa	76 500 m ³ , (2020)
Millespakka Oy (Millespakka, 2020)	-	Ei tietoa	Ei tietoa	4 003 m ³ , (2020)
Mustankorkea Oy (LSSAVI/5901/2018) (Mustankorkea, 2020)	-	Tasausallas (kierrätys)	Kyllä	155 380 m ³ , (2017)
Napapiirin Residuum Oy Kuusiselkä (PSAVI/185/04.08/2012)	RO (2 kpl) käänteisomoosi ja rejektin kierrätys jätettyttöön	Ei tietoa	Kyllä	23 724 m ³ , (2013)
Napapiirin Residuum Oy Alakorkalo (PSAVI/3853/2017)	Kierrätysaseman yhteydessä on jätevedenpuhdistamo	-	Ei tietoa	Ei tietoa
Perämeren Jätehuolto Oy (PSAVI/6/04.08/2011) (Perämeren jätehuolto, 2020)	RO käänteisomoosi yksikkö	Tasausaltaat	Kyllä	58 600 m ³ , (2020)
Pirkanmaan Jätehuolto Oy Tarastenjärvi (LSSAVI/17659/2021)	-	2017–2018 jätevesiin lisättiin hajunpoistokemikaalia	-	186 925 m ³ , (2020)
Porin jätehuolto (ESAVI/5471/2018)	-	Ei tietoa	Ei tietoa	48 402 m ³ , (2016)

Yhtiö	Erilliskäsittely	Esikäsittely	Suotovesi kierrätys	Vesimäärä vuodessa
Puhas Oy (ISAVI/1326/2016) (Puhas, 2020)	Laimeille jätevesille juurakkopuhdistamo	Tasausaltaat Ilmastus, hiekkasuodatus ja selkeytys	-	Väkevät 24 820 m ³ Laimeat 200 000 m ³ (2016)
Rauman seudun jätehuoltolaitos (ESAVI/5500/2015)	-	Tasausaltaat	-	28 500 m ³ , (2016)
Rosk'n Roll Oy Munkkaa (ESAVI/18790/2020)	Oman RO käänteisosmoosi	Tasausaltaat	-	Viemäri 74 499 m ³ Erilliskäsittely 15 244 m ³ , (2020)
Salpakierto Oy (ESAVI/16372/2020) (Salpakierto, 2020)	-	Tasausaltaat (hiekkasuodatus laimeasti likaantuneille vesille eli pilaantuneidenmaiden käsittely jätevedet)	-	Yhteensä 207 047 m ³ Suotovesi 152 751 m ³ , (2020)
Sammakkokangas Oy (LSSAVI/2812/2020) (LSSAVI/234/04.08/2011) (Sammakkokangas, 2020)	Maasuodattamo (biologinen hiekkasuodatus)	Tasausaltaat toimivat saostusaltaana sekä juurakkopuhdistamona	Kyllä	Luontoon 5 500 m ³ , (2020)
Savonlinnan seudun jätehuolto Oy (ISAVI/926/2018)	-	Tasausaltaat	-	27 000 m ³ , (2017)
Stormossen Oy (Mustasaari) (LSSAVI/1024/2020) (Stormossen, 2020)	Ilmastus-selkeytys - > hiekkasuodatus	Tasausaltaat	Ei tietoa	115 809 m ³ , (2020)
Vestia Oy Ylivieska (PSAVI/344/2017)	-	Öljyn- ja hiekanerotuskaivot	Kyllä	35 000–77 000 m ³ , (2008– 2016)
Ylä-Savon jätehuolto Oy Iisalmi (ISAVI/4490/2020)	-	Tasausaltaat	-	21 174 m ³ , (2019)

Taulukosta 1 huomataan usean tavanomaisen jätteen kaatopaikan tuottavan suhteellisen vähän jätevettä. Suuri osuus suomalaisista kaatopaikoista lukeutuu keskiuureksi tuottaen noin 100 000–200 000 m³/a jätevettä. Erilliskäsittely tämän kokoluokan kaatopaikoille vaatisi lisähenkilökuntaa, mikä osittain selittää erilliskäsittelyn vähäisen määrän. Pienempien kokoluokkien (< 100 000 m³/a) erilliskäsittely on taas helpommin hallittavissa. Pienempien kaatopaikkojen jätevesien vähäisen määrän vuoksi on myös ravinteiden talteenotto usein kannattamatonta investointikustannuksiin nähden.

Erilliskäsittelyyn käytössä olevia tekniikoita ei ole paljoa tavanomaisen jätteen kaatopaikoilla. Eniten sovelletut tekniikat ovat RO (reverse osmosis)-suodatus ja suotoveden kierrättäminen, usein myös yhdistettynä. Juurakkopuhdistamo on myös käytössä kahdessa kohteessa. Esikäsittelyinä suosituimmat menetelmät ovat selvästi saostus ja hiekkasuodatus.

2.3 Ekokymppi

Ekokymppi oli tutkituista kaatopaikoista ainoa kunnallinen kaatopaikka, minkä prosessi kykeni ottamaan ravinteita talteen. Ekokymppin toiminta-alue kattaa Kainuun ja Vaalan kunnat. Jätteenkäsittelykeskuksen aktiivisesti käytössä oleva pinta-ala on noin 20 hehtaaria, mistä 6 ha on suljettua jätetäyttöä ja 2 ha aktiivisesti täytössä. Käsittelyyn kerätään suotovedet sekä jätteenkäsittelykenttien hulevesiä. Käsiteltävän veden määrä vaihtelee suuresti, joten satunnaisesti vedenkäsittelyprosessi on kuivana. (Piirainen, 2022)

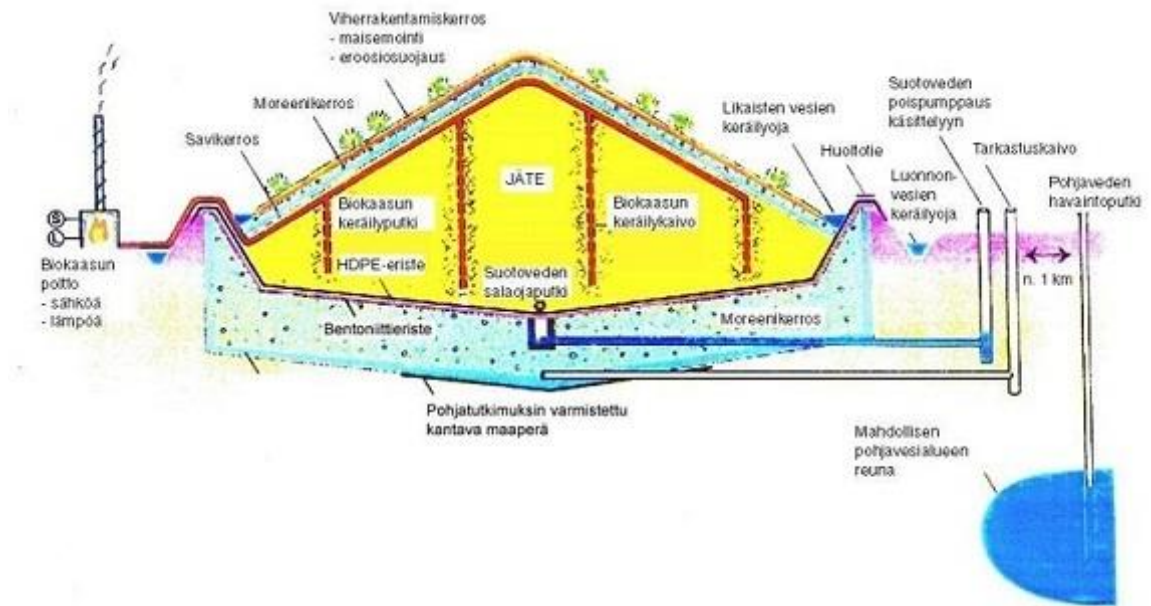
Prosessin alussa lisätään saostuskemikaalia ja erotetaan liete flotaatiolla. Viimeisenä puhdistuksena jätevesi pumpataan zeoliittisuodatuksen, missä zeoliitti toimii kationin vaihtohartsina ja kantoaineena nitrifioiville bakteereille. Zeoliittisuodatuksen tarkoituksen on laskea ammoniumtyppikuormaa. Ravinteiden talteenotto tapahtuu zeoliittisuodattimien regeneroinnin yhteydessä, missä suodattimet pestään NaOH:lla ja nitraatti liukenee pesuliuokseen. Talteen otettavan nitraattiliuoksen hyödyntämisen mahdollisuuksia tutkitaan, mutta tämänhetkinen käyttö on kierrätys keräysaltaaseen, jolloin nitraatti yhdessä orgaanisen aineksen kanssa mahdollistaa denitrifikaatiobakteerien kasvun, mikä kuluttaa orgaanista ainesta. Prosessin haasteina on suuri vaihtelevuus jäteveden määrässä ja orgaanisen aineksen sekä ammoniumtypen määrässä. Erityisen haitalliseksi on todettu palonestoaineet, jotka tappavat nitrifikaatiobakteerikannan. (Piirainen, 2022)

3 Kaatopaikkavesien karakterisointi

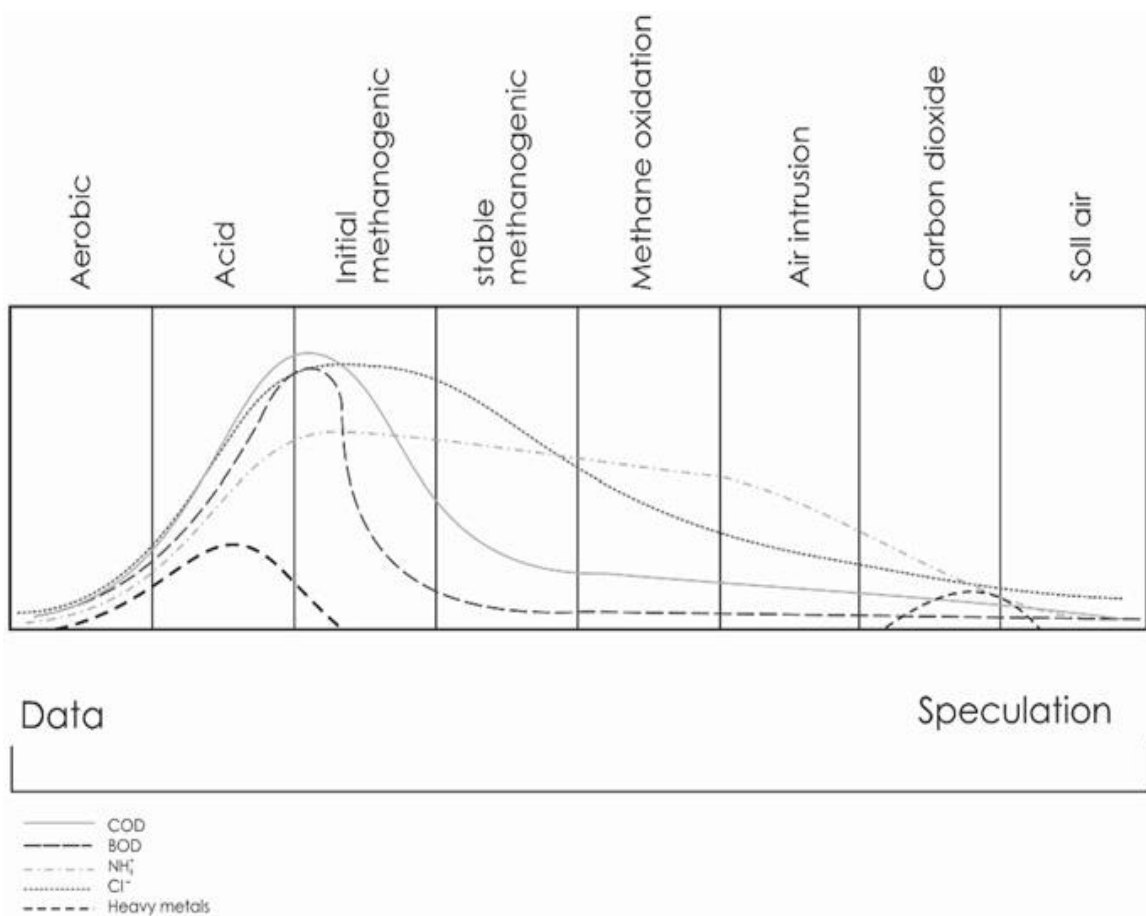
Tässä luvussa karakterisoidaan kaatopaikkavesiä tarkastellen eri ikäisten kaatopaikkojen tyypillisiä ominaisuuksia sekä jätteenkäsittelykeskuksien eri alueiden tuottamia jätevesiä. Kaatopaikkavesillä yleisesti tarkoitetaan koko kaatopaikan tuottamaa jätevettä, josta suurin osa on suotovettä aktiivisilta jätetäytöiltä. Suotovedet on yksi suurimmista kuormittajista niin haitta-aine pitoisuuksien kuin määrän mukaan kaatopaikoilla. Vaikka suotoveden määrä riippuu vahvasti sadannan määrästä, on vuositasolla kumulatiivinen määrä merkittävä varsinkin Suomessa johtuen runsaasta lumen määrästä.

3.1 Kaatopaikkojen jaottelu

Kaatopaikkavesien laatu riippuu hyvin monesta muuttujasta kuten pH-arvo, kosteus, ikä ja jätteen laatu. Kuitenkin kaatopaikkojen suotovedet voidaan jaotella kaatopaikan iän mukaan nuoriin (< 5 vuotta), keski-ikäisiin (5–15 vuotta) ja vanhoihin (>15 vuotta), mikä auttaa sopivan jätevedenkäsittelymenetelmän valinnassa. Suotovesien kaikkein korkeimmat ravinnepitoisuudet saavutetaan nuorella kaatopaikalla eli muutaman vuoden aikana, minkä takia erilliskäsittelyn ja talteenoton suunnittelu vain nuorille suotovesille ei ole suosittua vaan usein pyritään pitkäaikaiseen ratkaisuun. Jätetäytön tyypillinen rakenne on esitettyinä kuvassa 2 ja elinvaiheet ovat esitettyinä kuvassa 3 ja suotoveden koostumuksen muutosta havainnollistavat COD (Chemical oxygen demand), BOD (Biological oxygen demand), NH_4^+ , Cl^- ja raskasmetallit eri vaiheissa. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)



Kuva 2 Nykypäiväisen jätetäytön tyypillinen rakenne. (LHJ, 2020a)



Kuva 3 Jätetäytön eri hajoamisvaiheet ja suotoveden koostumusta havainnollistavat määrät. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Jätetäyttö käy nopeasti aerobisen vaiheensa alussa läpi, jolloin vapaa happi jätetäytön väleissä sekä jätteesen sitoutunut happi kuluu loppuun bakteerien toimesta tuottaen pääasiallisesti hiilidioksidia ja vettä. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020) Tämän jälkeen alkaa nuorille jätetäyttöille tyypillinen anaerobinen happovaihe, missä jätetäyttöön kertyy orgaanisia happoja asetogeenisten, hydrolyyttisten ja fermentatiivisten bakteerien hajottaessa hiilihdraatteja. Ammoniakkia syntyy taas proteiinipitoisten aineiden hajoamisesta. Jätetäytön suotoveden happamoituessa liukoisuus paranee johtaen suureen epäorgaaniseen ionikonsentraatioon. Happovaiheesta siirryttäessä metanogeeniseen vaiheeseen suotovesi sisältää myös suurimmat COD ja BOD kuormat. Happovaiheesta siirryttäessä jätetäytön sisäisen veden pH-arvo alkaa tasaantumaan neutraalimmaksi johtaen metanogeenisten bakteerien esiintymiseen. Metanogeeniset bakteerit hajottavat happovaiheessa kerääntyneitä orgaanista happoa metaaniksi ja hiilidioksidiksi. (Kjeldsen, Barlaz, Rooker, Baun, Ledin ja Christensen, 2002; Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Metanogeeninen vaihe kestää hyvin pitkään hitaan hajoamisen vuoksi. Metanogeenisen vaiheen alku voidaan huomata metaanin tuotantona aiemmin syntyneistä hapoista eli kaatopaikkakaasuja alkaa muodostumaan huomattavia määriä. Vaiheen aikana suotovesien pH-arvo muuttuu neutraaliksi ja näin ollen epäorgaanisten ionien määrä laskee sekä BOD kuormitus romahtaa. Suotovesissä esiintyvä orgaaninen aines on suurimmilta osilta humusaineita, lisäksi ammoniakkia ja ammoniumia esiintyy vieläkin. (Kjeldsen et al. , 2002; Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Lopulliset vaiheet, missä jätetäyttö muuttuu takaisin aerobiseksi, indikoi metaanin tuotannon loppumista, mitä ei toistaiseksi ole havaittu käytännössä. Vaiheet perustuvat spekulointiin ja varmaa tietoa niiden alkamisesta ei ole. Vaiheessa anaerobiset eliöt korvaantuisivat aerobisilla ilman tunkeutuessa jätetäyttöön. (Kjeldsen et al. , 2002) Koska tämän ikäisen kaatopaikan toiminnasta ei ole tietoa, ei aerobisia täydellisen hajoamisen vaiheita käydä tarkemmin läpi.

Kaatopaikkavesien karakterisointi iän mukaan on haastavaa, mutta mahdollista yleisellä tasolla. Taulukossa 2 on esitetty karkeat haitta-ainearvot iän mukaan. Arvot voivat vaihdella kaatopaikkojen välillä huomattavasti johtuen jätteen laadusta, lämpötilasta ja kosteudesta. Yleisesti kuitenkin arvot ovat suuntaa antavia ja voivat helpottaa käsittelymenetelmien valinnassa.

Taulukko 2 Karakteristisia tunnuslukuja nuorten, keski-ikäisten ja vanhojen kaatopaikkojen suotovesille. Taulukon tiedot koottu useasta lähteestä ja varsinkin ammonium tyyppien pitoisuuksissa suuria vaihteluja. (Babaei, Sabour ja Moftakhari Anasori Movahed, 2021; Kjeldsen et al. , 2002; Li ja Liu, 2021; Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020; Tejera, Miranda, Hermosilla, Urra, Negro ja Blanco, 2019)

	Nuori	Keski-ikäinen	Vanha
Ikä, (vuosia)	< 5	5–15	> 15
pH	< 6,5	6,5-7,5	> 7,5
COD, (mg/L)	> 10 000	5 000 – 10 000	< 5 000
BOD5/COD	0,5 – 1,0	0,1 – 0,5	< 0,1
TAN, (mg/L)	< 2000	2 000 – 400	50 – 400
Raskasmetallit	Matala–kohtalainen	Matala	Matala
RH/HA	RH (≈80 %)	RH (<30%), HA	HA
Biohajoavaisuus	Korkea	Kohtalainen	Matala
Lyhenteet: TAN: Kokonais ammoniakki ja ammonium tyyppi, RH: Rasvahapot, HA: Humusaineet			

Yleisesti nykypäivän kaatopaikat sisältävät erilaisia alueita eri jätteille tai niiden käsittelylle eli toimivat jätteenkäsittelykeskuksina. Ongelmajätteet, pilaantuneet maat ja tavanomaiset jätteet sijoitetaan sekä käsitellään erillään, minkä vuoksi nykypäivän jätteenkäsittelykeskuksilla on erilaisia jätevesilaatuja. Näistä kaikkein haitallisimmat ovat tyypillisesti ongelmajätteen ja tavanomaisen jätteen suotovedet. Usein kaikki jätevedet yhdistetään varsinkin käsittelyn tapahtuessa muualla, vaikka mahdollisia erilliskäsittelyjä esimerkiksi ongelmajätteen suotovesille olisi. Laimeimmat vedet yleisesti päästetään luontoon ja väkevät sekoittuvat keskenään jatkokäsittelyä varten. Ravinteiden talteenoton kannalta ei välttämättä ole hyödyllistä sekoittaa ravinnerikkaampia suotovesiä laimeampien joukkoon, siksi olisi hyvä huomioida eri osa-alueiden tuottamien jätevesien pitoisuudet esimerkiksi kustannuslaskennan kannalta.

Taulukossa 3 on esitettyä vuoden 2019 Riikinnevan jätekeskuksen tasausaltaan, ongelmajätteen, suljetun tavanomaisen jätteen jätetäytön ja aktiivisen tavanomaisen jätteen jätetäytön suotovesien pitoisuuksia. Taulukosta huomataan suurimman eron pitoisuuksissa olevan suljetun ja aktiivisen jätetäytön välillä saman jätekeskuksen sisällä. Taulukossa esitetty suljettu tavanomainen jätetäyttö on ollut suljettuna seitsemän vuotta, mikä näkyy BOD₇ arvossa parhaiten.

Taulukko 3 Riikinnevan vuoden 2019 vesientarkkailun vuosiyhteenvedon ongelmajätteen suotovesi (P7), suljetun tavanomaisenjätteen suotovesi (P9), aktiivisen tavanomaisenjätteen suotovesi (P15) ja tasausallas (P1) ennen jätevedenpuhdistamolle pumpausta mitatut pitoisuudet vuosikeskiarvoina tyypillisiltä haitta-aineilta. (Dnro. 9091/2020 Keski-Savon jätehuolto liikelaitosyhtymä, Liite 7 Riikinneva jätekeskus vuosiyhteenvedo 2019.)

	P1 tasausallas (jäteveden- puhdistamolle pumpattavat)	P7 Ongelmajätteen suotovesi	P9 Loppusijoitusalue suotovesi (suljettu)	P15 Loppusijoitusalue suotovesi (aktiivinen)
pH	-	-	7	8
sähkönjohtavuus, mS/m	463	2300	-	-
Kiintoaine, mg/l	37	15	131	40
COD, mg/l	195	380	275	568
BOD7, mg/l	23	2	22	30
Kok. N, mg/l	54	7	115	268
NH4-N, mg/l	42	2	102	157
Cl-, mg/l	1040	9600	135	468
SO4-2, mg/l	318	1350	47	758
Kok. P, mg/l	0,5	0,1	1,1	2,6
Fe, mg/l	1,8	0,8	64	4,1
Sinkki, ug/l	330	1055	-	-
Kupari, ug/l	50	120	-	-
Kromi, ug/l	16	51	-	-
Nikkeli, ug/l	77	218	-	-
Lyijy, ug/l	22	525	-	-
Arseeni, ug/l	6	5	-	-
Kadmium, ug/l	2	16	-	-
Elohopea, ug/l	1	0	-	-

3.2 Haitta-aineet

Kaatopaikkavedet sisältävät laajan spektrin erilaisia yhdisteitä, joista osa on ympäristölle tai vedenpuhdistusprosesseille haitallisia. Kuitenkin haitallisten aineiden esiintyminen ja pitoisuudet ovat hyvin kaatopaikkakohtaisia, riippuen kaatopaikalle sijoitetusta jätteestä sekä kaatopaikan iästä. Yhdisteet voidaan jaotella viiteen kategoriaan: liennut orgaaninen aines, epäorgaaniset komponentit, raskasmetallit, ksenobiottiset orgaaniset yhdisteet ja mikrobiologiset organismit.

Liuenutta orgaanista ainesta kuvataan usein COD tai TOC (Total organic carbon) arvoilla, joista COD on hyvin korkea kaatopaikkojen eliniän ajan. COD-arvo ei kuvaa täydellisesti liunneen orgaanisen aineksen määrää, sillä sen määrittämisessä myös epäorgaaniset aineet voivat hapettua. Liennut orgaaninen aines sisältää huonosti biohajoavia yhdisteitä kuten humusaineita, jotka aiheuttavat haittaa puhdistusprosesseille, kuten membraanien likaantumista. (Kjeldsen et al. , 2002) Liennut orgaaninen aines voi olla myös haitallista ympäristölle, koska se sitoo rautaa ja fosforia pois mikrobien käytöstä. (Findlay, Sinsabaugh, 2003)

Epäorgaanisiin komponentteihin lukeutuvat useat ionit kuten kalsium, ammonium, kloridi ja sulfaatti. Näistä kloridi ja ammonium esiintyy usein suurissa pitoisuuksissa. Kloridi nostaa sähkönjohtavuutta vedessä ja näin ollen voi olla hyödyllinen sähkökemiallisessa käsittelyssä. Ammoniumtyyppipitoisuudet kaatopaikkavesissä pysyvät korkealla läpi kaatopaikan iän, minkä vuoksi typenpoisto on kaatopaikkavesien käsittelyn tärkeimpiä tavoitteita. Ammonium, nitraatti ja nitriitti toimivat ravinteina aiheuttaen rehevöitymistä. Sulfaatti on myös haitallista ympäristölle, mutta sen pitoisuudet ovat usein hyvin pienet kaatopaikkojen suotovesissä, koska se redusoituu sulfidiksi. (Kjeldsen et al. , 2002)

Raskasmetallit, kuten lyijy ja kadmium ovat haitallisia ympäristölle pysyvyyden takia, jolloin ne jäävät kiertämään ekosysteemiin ja näin ollen kertyvät ekosysteemeihin. Kaatopaikkojen suotovesien raskasmetallipitoisuudet kuitenkin ovat hyvin pieniä ja näin ollen katsotaan usein toissijaisiksi. Hyvin pienien pitoisuuksien takia talteenotto on lähes mahdotonta olemassa olevilla tekniikoilla eikä kannattavaa. (Kjeldsen et al. , 2002)

Ksenobioottiset orgaaniset yhdisteet ovat syntyneet ihmisten vaikutuksen takia kuten fenolit, torjunta-aineet ja useat aromaattiset yhdisteet. Yleisesti ksenobioottisten yhdisteiden pitoisuudet ovat hyvin pieniä alle 1 mg/L yhdistekohtaisesti. (Kjeldsen et al. , 2002) Ksenobioottiset yhdisteet ovat hyvin pysyviä ja myrkyllisiä pienissäkin määrissä eläimistöille. Vaikka tavanomaisen jätteen kaatopaikoille ei tule sijoittaa ksenobioottisia yhdisteitä sisältävää jätettä, löytyy pieniä pitoisuuksia silti useilta kaatopaikoilta. (Baun, Ledin, Reitzel, Bjerg ja Christensen, 2004)

Mikrobiologiset organismit eli bakteerit, virukset ja sienet ovat vähemmän tutkittu ryhmä kaatopaikkavesistä. Bakteerien olemassaolo on hyvin lämpötilariippuvainen ja näin ollen muuttuva suotovesissä. Haitallisten bakteerien määrä usein laskee kaatopaikan iän myötä ja lopulta laskee huomaamattomiin. Viruksia on havaittu vain hyvin harvoilla kaatopaikoilla. Sienien olemassaoloa on tutkittu vähän ja vain yksi haitallinen sieni on havaittu useamman tutkimuksen toimesta. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

4 Käsittelymenetelmät

Tässä luvussa tarkastellaan uusia kokeellisia jäteveden käsittelymenetelmiä kaatopaikkavesille. Myös vanhempia käytössä olevia tekniikoita tarkastellaan kaatopaikkavesien soveltuvuuden kannalta. Luku on jaettu viiteen kategoriaan; fysikaaliset, kemialliset, sähkö-kemialliset ja biologiset, menetelmien toimintaperiaatteen mukaan ja lopuksi esitetään yhdistettyjä tekniikoita sekä tiivistetään tekniikat yhteen.

4.1 Fysikaaliset menetelmät

Fysikaalisten menetelmien toiminta perustuu fysikaalisiin ilmiöihin eli haitta-aineita ei hajoteta vaan erotetaan vedestä. Menetelmistä tarkastellaan paineistettuja membraanisuodatustekniikoita ja suodatuksen kanssa usein yhdistetystä suotoveden kierrätyksestä. Suotoveden kierrätys jätetäyttöön käsitellään fysikaalisena menetelmä, vaikka tosiasiallisesti käsittely tapahtuu biologisesti, koska se on usein yhdistetty suodatuksen kanssa. Myös flotaatio sekä koagulaatio-flokkulaatio sisältyvät fysikaalisiin menetelmiin, usein käytettynä esi- tai jälkikäsittelyinä.

Membraanisuodatukset

Pääasiallisesti neljää eri membraanisuodatus tekniikkaa on sovellettu kaatopaikkavesien käsittelyyn: mikrosuodatus, ultrasuodatus, nanosuodatus ja RO eli käänteisosmoosi. Nimien

mukaisesti membraanit eroavat huokoskoon mukaan lukuun ottamatta käänteisosmoosia, jossa käytetään puoliläpäisevää RO-kalvoa. Membraaneista suurin huokoskooltaan, mikro-suodatus on yleisesti käytössä vain esisuodatuksena nanosuodatusta tai RO-tekniikkaa ennen.

Paineistettujen membraanisuodattimien käyttö ainoana puhdistusmenetelmänä ei ole toimiva ratkaisu, vaikka ne pystyvät suodattamaan varsin tehokkaasti huokoskokonsa mukaisesti haitta-aineita. Mikro-suodatus suodattaa kolloidisia ja suspendoituneita partikkeleita, ultrasuodatus makromolekyylejä eli orgaanista ainetta ja bakteereja (Lin, Huang ja Hao, 1999), nanosuodatus ja käänteisosmoosi kykenevät suodattamaan epäorgaanisia ainetta kuten metalli- sekä sulfaatti-ioneja ja mikrobisaasteita. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Membraanisuodatuksen suurimpia haasteita on membraanien likaantuminen, mikä aiheuttaa suhteellisen lyhyen membraanien käyttöiän. Membraanien likaantumista voidaan ehkäistä jaksottaisella esikäsittelyllä, kuten kalkkisaostus-mikro-suodatus-nanosuodatus, jolloin voidaan saada korkeat puhdistustulokset (> 90 prosenttia) orgaanisen, epäorgaanisen aineen sekä ammoniakkin poistolle. (Amaral, Pereira, Nani ja Lange, 2015) Likaantumista aiheuttaa membraaneissa paljon humusaineet, joiden esikäsittely voidaan tehdä myös perinteisellä aktiivilieteprosessilla, jolloin membraanisuodatus toimii jatkokäsittelynä varmistaen veden korkealaatuisuuden. (Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan ja Moulin, 2008)

Membraanisuodatuksen tarkoitus on erottaa haitta-aineita vedestä. Suodatuksen sivutuotteena tuleva rejektivesi, jossa haitta-ainepitoisuudet ovat korkeat, on useasti ongelmallista puhdistaa. Rejektivettä voidaan ajatella myös tuotteena, eikä haittana ja siksi on tutkittu rejektiveden käsittelyyn soveltuvia ravinteiden talteenottomenetelmiä. Etuna rejektiveden ravinteiden talteenotossa on pienempi hydraulinen kuorma ja näin ollen pienempi kapasiteetin tarve, mutta myös haitallisten aineiden pitoisuudet ovat suuremmat. (Li ja Liu, 2021)

Suotoveden kierrätys

Suotoveden kierrätys toimii samalla tavalla kuin biologinen suodatus, missä jätetäyttö toimii huokoisena kolonnin täyteaineena, ja jätetäytön sisäiset mikrobikannat käsittelevät suotovettä. Suotoveden kierrättäminen toimii myös ravinteiden talteenottona, mikäli kaatopaikan tuottama metaani hyödynnetään, sillä suotoveden kierrätys nostaa kosteutta jätetäytössä ja näin nopeuttaa biologista hajoamista. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020) Kierrätys on usein yhdistetty suodatustekniikoiden kanssa kierrättämällä suodatuksen rejektii takaisin jätetäyttöön. Suodatuksen rejektin kierrättäminen voi konsentroida suotovettä pitkällä aikavälillä.

Flotaatio

Flotaatio on vanha erotusmenetelmä hydrofobisten ja -fiilisten yhdisteiden välillä, missä hydrofobiset yhdisteet kulkeutuvat nestefaasin pinnalle ilmakuplien mukana. Flotaatiota ei ole tutkittu spesifisesti kaatopaikkavesien käsittelyyn, mutta muiden jätevesien kanssa tekniikka keskittyy kolloidisiin partikkeleihin ja makromolekyyleihin. (Renou et al. , 2008) Kaatopaikkavesiin flotaatiota voidaan hyödyntää vaikeasti biohajoavan aineksen poistoon esi- tai jälkikäsittelyyn. (Zouboulis, Jun ja Katsoyiannis, 2003)

Koagulaatio–flokku-laatio

Koagulaatio–flokku-laatio on fysikaalis-kemiallinen käsittelymenetelmä, joka toimii saostuksen tavoin. Koagulaatiovaiheessa lisätään kemikaalia kolloidisten partikkelien suspension epävakauttamiseksi ja aggregaattien muodostamiseksi. Flokkulaatiovaiheessa pyritään muodostamaan suurempia aggregaatteja (flokkeja) ja lopuksi saostuman annetaan laskeutua lietteeksi. Menetelmää ei voida käyttää yksittäisenä heikon puhdistustehon takia, joten koagulaatio-flokku-laatio usein yhdistetään esikäsittelyksi biologisille menetelmille. Menetelmän heikon puhdistustehon lisäksi se on herkkä pH-arvolle, kasvattaa alumiini- tai rautapitoisuutta vedessä riippuen koagulaatio kemikaalista ja tuottaa lietettä. (Luo, Zeng, Cheng, He ja Pan, 2020; Renou et al. , 2008)

4.2 Kemialliset menetelmät

Kappaleessa käsitellyt kemialliset menetelmät sisältävät yleisesti kemikaalin lisäyksen ja perustuvat kemiallisiin reaktioihin. Käsitellyt menetelmät ovat usein käytössä esi- tai jälkikäsittelevä vaiheessa tiettyjen aineiden poistoa varten. Laajimmin käytössä olevat menetelmät ovat kemiallinen saostus ja hapettaminen sekä typen strippaus ilmalla. Uudempana menetelmänä aktiivihiili adsorptiota on tutkittu suotovesien puhdistukseen viime vuosikymmenillä, vaikka aktiivihiili on kaikista yleisin adsorbentti on myös mahdollista käyttää muita adsorbentteja kuten zeoliittia. Kemialliset menetelmät ovat yksinkertaisia täydennysmenetelmiä, jotka parantavat tai mahdollistavat biologista käsittelyä.

Kemiallinen saostus

Kemiallinen saostus on hyvin laajasti käytössä jätevedenpuhdistamoilla, sillä fosforin saostaminen tukee aktiivilietemenetelmää hyvin, biologisen käsittelyn heikon fosforin poiston takia. Saostuksessa liuenneet ionit reagoivat saostuskemikaalien kanssa muodostaen liukenematonta sakkaa eli lietettä. Liette on ravinnerikasta ja näin ollen hyödyllistä lannoitteena, mutta perinteisen saostuksen ravinteet ovat sellaisessa muodossa lietteessä, ettei kasvit voi hyödyntää niitä ja jatkokäsittely on vaativaa. Uutena menetelmä struviittisaostus parantaa tuotteen käytettävyyttä, sillä tuotteena muodostuu struviittia eli magnesiumammoniumfosfaatti kiteitä. Saostuksessa struviittia muodostuu, kun ammoniumioni (NH_4^+), fosfaatti (PO_4^-) ja magnesiumioni (Mg^{2+}) yhteispitoisuus on korkeampi kuin niiden liukoisuus, siksi kaatopaikkavesien struviittisaostuksessa tulee lisätä fosfaattia ja magnesiumia, koska tyypillinen kaatopaikkavesi sisältää suuren ammoniumioni määrän. (Huang, Xiao, Zhang ja Ding, 2014)

Kemiallinen hapetus

Kemiallinen hapetus perustuu haitta-aineiden hapettumisreaktioon, hapettamista on tutkittu paljon ja viime vuosina tutkimustyö on keskittynyt AOP (advanced oxidation process), missä hapettumisreaktio suoritetaan vahvoilla hapettimilla kuten O_3 tai H_2O_2 yhdessä säteilytyksen kanssa. Kemiallinen hapettuminen on keskittynyt myös sähkökemialliseen

hapettumisprosessiin, missä hapettimet valmistetaan in situ eikä syötetä valmiita hapettimia. (Renou et al. , 2008) Hapettumismenetelmää käsitellään lisää sähkökemiallisten menetelmien yhteydessä kappaleessa 4.3.

Adsorptio

Aktiivihiihliadsorptio perustuu haitta-aineiden adsorptioon aktiivihiihen pinnalle fysikaalisten tai kemiallisten vaikutuksien ansiosta. Menetelmää hyödynnetään pysyvien haitta-aineiden poistoon vedestä, mutta ei itsessään hajottamaan haitta-aineita. Laajimmin kaatopaikkavesien hoitoon on hyödynnetty rakeista (GAC) tai jauhattua (PAC) aktiivihiihtä. Aktiivihiihi menetelmän haasteena on korkea kulutus GAC/PAC ja jatkuva aktiivihiihen regenerointi kolumni adsorptiossa. (Luo et al. , 2020) Kookoskuorijätteestä valmistettua aktiivihiihtä on tutkittu tarkoituksena etsiä kustannustehokasta vaihtoehtoa aktiivihiihi lähdeksi. Otsonoidulla kookoskuorijäteaktiivihiihelle päästiin parempiin puhdistustuloksiin ammonium typen ja COD poiston osalta. (Kurniawan, Singh, Avtar, Othman, Hwang, Albadarin, Rezakazemi, Setiadi ja Shirazian, 2021)

Strippaus

Strippauksessa jäteveden läpi viedään ilmaa, jolloin yhdisteet kuten helposti haihtuvat orgaaniset aineet, ammonium ja metaani siirtyvät nestefaasista kaasufaasiin. Strippaus on kaatopaikkavesien osalta ideaali sen korkean ammoniumtypen poistotehon vuoksi, mutta strippaus tarvitsee tehokkaan toiminnan mahdollistamiseksi korkean pH-arvon (> 10). (Luo et al. , 2020) Strippauksessa ammonium reagoi hydroksidi-ionin kanssa ammoniakiksi ja vedeksi, jolloin kaasufaasissa poistuva typpi on ammoniakkimuodossa, mikä aiheuttaa vaaran ilman saastumiselle. Kuitenkin ammoniakki voidaan ottaa talteen absorboimalla happoliuokseen kuten fosforihappo muodostaen ammoniumfosfaattia. Talteenoton taloudellinen kannattavuus on kuitenkin huono strippauksen korkean sähkökustannuksien ja absorptioon käytettävien happojen kustannuksien vuoksi. (dos Santos, de Castilhos Júnior, Armando Borges, Nadaleti ja Lourenço, 2020)

4.3 Sähkökemialliset menetelmät

Sähkökemialliset menetelmät on suhteellisen uusi jätevedenkäsittelyn haara ja näin ollen kaipaavat jatkotutkimusta ennen käytännön toteuttamista kaatopaikkavesien käsittelyyn. Sähkökemialliset menetelmät ovat lupaavia materiaalien talteenoton kannalta. Sähkökemiallinen käsittely perustuu elektronin vaihtoon liuoksen ja elektrodin välillä, mikä saadaan aikaan luomalla sähkökenttä anodin ja katodin välille. Sähkökemialliset menetelmät biologisten menetelmien mukaisesti hajottavat orgaanisia yhdisteitä hapettumisreaktiolla ja ammoniumtyyppiä pelkistymisreaktiolla. Eniten tutkittuja kaatopaikkavesien käsittelyyn soveltuvia tekniikoita ovat sähkökemiallinen hapettuminen, koagulaatio ja electro-Fenton. (Luo et al. , 2020)

Sähkökemiallinen hapetus

Sähkökemiallinen hapettuminen voi tapahtua joko suorasti anodin pinnalla tai epäsuorasti hapettimien avulla kuten hydroksyyli-radikaali, kloori tai persulfaatti. Epäsuora hapettuminen on tärkeä tekijä kaatopaikkavesien käsittelyssä, sillä suotovedet sisältävät usein korkean määrän kloridia, joka voi hapettua klooriksi sähkökemiallisen käsittelyn aikana. Pelkistysreaktiot ovat tärkeitä nitraatti ja raskasmetalli -ionien käsittelyssä. Pelkistysreaktioissa voidaan pelkistää raskasmetalleja katodin pinnalle ja tuottaa tyyppikaasua, jolloin talteenoton kannalta katodinen pelkistys on hyvin lupaava. (Deng, Zhu, Chen, Feng, Wang, Kuang ja Hu, 2020)

Sähkökemiallinen koagulaatio

Sähkökemiallinen koagulaatio toimii erotustekniikkana eikä hajota haitta-aineita hapettamisen tapaan, vaikka se voidaan yhdistää hapettumisen kanssa esikäsittelyinä. Koagulaatiossa anodimateriaali uhrataan muodostaen positiivisesti varautuneita metalli-ioneja, jotka reagoivat katodilla muodostuvien hydroksidi-ionien kanssa. Muodostuneet metallihydroksidit toimivat flokkulantteina ja sitovat orgaanisia yhdisteitä sedimentoituessaan. Katodilla syntyy myös vetykaasua, joka aiheuttaa nosteen ja tuo liuoksen pintaan hydrofobiset yhdisteet. Pohjalle sedimentoitunut liete voidaan kerätä talteen ja mahdollisesti hyödyntää lisäkäsittelyn avuin. (Deng et al. , 2020)

Electro–Fenton

Electro–Fenton menetelmä toimii sähkökemiallisen hapettumisen tavoin, mutta vain epäsuoran hapettumisen avulla. Menetelmässä muodostetaan hydroksidiradikaaleja syöttämällä hapetta ja rautakatalyyttia (Fe^{2+} , Fe^{3+} tai rautaoksidi) katodille, jossa syntyy vetyperoksidia. Vetyperoksidi muodostaa hydroksidiradikaaleja sekä vettä rautakatalyytin kanssa. Electro–Fentonin suurimpia heikkouksia on ammoniumtyypen poistaminen ja matalan pH-arvon vaatiminen, mikä vaatisi suotovesien happamointia kemiallisesti. (Deng et al. , 2020)

Sähkökemiallisten menetelmien puhdistustehokkuus riippuu vahvasti elektrolyyttiliuoksen eli suotoveden pH-arvosta, sähkövirran tiheydestä sekä anodi- ja katodimateriaalista. pH-arvo on erityisen tärkeää electro–Fenton menetelmän toiminnan kannalta, sillä rautakatalyytin toiminta lakkaa korkean pH-arvon elektrolyyttiliuoksissa. Anodin tai katodin passivoituminen on myös huomioitava reaktoria suunnitellessa, sillä Mg- ja Ca-ionit hapettuvat helposti elektrodien pinnalle passivoiden elektrodin, tähän on tarjottu ratkaisuksi elektrodien napojen vaihtoa. (Deng et al. , 2020)

4.4 Biologiset menetelmät

Biologiset jäteveden käsittely menetelmät perustuvat mikrobien toimintaan, missä mikro-organismit hajottavat orgaanisia haitta-aineita jätevedestä. Mikrobikanta voi olla anaerobinen tai aerobinen riippuen sovelluksesta. Anaerobisissa olosuhteissa mikro-organismit hajottavat orgaaniset aineet biokaasuksi ja aerobisissa olosuhteissa hiilidioksidiksi ja lietteeksi. Biologinen käsittely soveltuu jätevedelle, jonka BOD on korkea sekä typen poistoon, jos BOD/COD suhde on suurempi kuin 0.5. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Typen poistaminen jätevedestä on tärkeää, sillä se aiheuttaa ympäristön rehevöitymistä. Typpi poistetaan nitrifikaatio–denitrifikaatio menetelmällä, joka perustuu bakteerien toimintaan. Nitrifikaatiovaiheessa bakteerit hapettavat ammoniumtyypen nitriitiksi ja nitriitin nitraatiksi. Nitrifikaatiobakteerit käyttävät hapetusreaktiossa syntyvää energiaa, joten

prosessi tarvitsee happea eli tapahtuu aerobisissa olosuhteissa. Denitrifikaatiossa bakteerit pelkistävät nitraatti-ionit typpikaasuksi. Denitrifikaatiobakteerit voivat toimia aerobisissa olosuhteissa ja hapettomissa, hapettomissa olosuhteissa happea on läsnä vain kemiallisesti sitoutuneena, eikä tarkoita samaa kuin anaerobinen. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

4.4.1 Aktiivilieteprosessit

Aktiivilieteprosessit ovat pitkään käytössä olleita prosesseja. Prosesseille on tunnusomaista mikro-organismien ja bakteerien suspensio puhdistettavassa jätevedessä. Prosessit voivat olla aerobisia kuten aktiiviliete ja laguuni, anaerobisia kuten UASB (up-flow anaerobic sludge blanket) eli ylöspäin virtaava anaerobinen lietepeite ja mädättämö tai yhdistelmiä molemmista kuten SBR (sequencing batch reactor) eli jaksotettu panosreaktori, joka sopii myös nitrifikaatio-denitrifikaatio prosessien kanssa.

Aerobiset prosessit ovat laajalti käytössä ja vähentävät orgaanista ainesta sekä ammoniumtypen määrää nitrifikaatiolla. Sivutuotteen syntyy lietettä, joka koostuu pääosin orgaanisesta aineesta ja voidaan hyödyntää lannoitemateriaalina jatkokäsittelyllä.

Anaerobisissa prosesseissa mikro-organismit kuluttavat orgaanista ainesta, minkä takia prosessi soveltuu korkean orgaanisen kuorman jätevedelle kuten nuoren kaatopaikan suotovedelle. Mikro-organismit tuottavat metaania, jota yleisesti kutsutaan biokaasuksi ja joka voidaan hyödyntää energianlähteenä. Anaerobiset prosessit tuottavat vähemmän lietettä, mutta eivät pysty poistamaan ammoniumtyppeä.

4.4.2 Kantoaineprosessit

Kantoaineprosessit ovat uudempi prosessimalli, joka kehitettiin perinteisten aktiivilieteprosessin lietteen erottumisen haastavuuden takia. Kantoaineprosessien hyötynä on vain ylimääräisen biomassan erottaminen, toisin kuin aktiivilieteprosessissa käytettävä lietekierto. Kuten aktiivilieteprosessei voidaan kantoaineprosessikin toteuttaa aerobisissa olosuhteissa kuten biologiset suodattimet, MBBR (moving-bed biofilm reactor), RBC

(rotating biological contactors) tai anaerobisissa olosuhteissa kuten anaerobinen suodatin ja FBR (fluidized bed reactor).

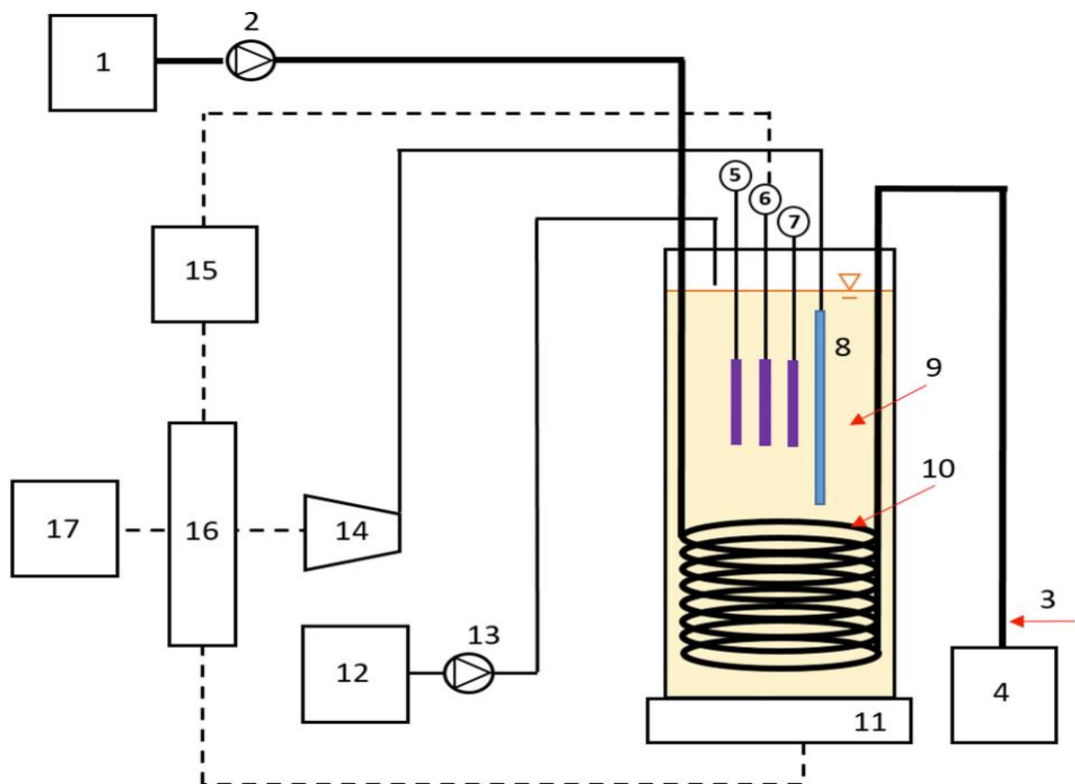
Aerobiset kantoaineprosessit toimivat lähes tulkoon samalla tavalla kuin aktiivilieteprosessit. Eroavaisuus menetelmien välillä on kantoaineprosesseissa mikro-organismien kiinnittyminen epäaktiiviseen kantoaineeseen kuten muoviin. MBBR prosessissa kantoaineena toimii pienet partikkelit suspensiossa jätevedessä, joihin mikro-organismit kiinnittyvät. RBC prosessissa kantoaineena on hitaasti pyörivä roottori, johon muodostuu muutaman millimetrin paksuinen biofilmi. Biologisten suodattimien tapauksessa kantoaineena voidaan käyttää myös murskattua kiviainesta tai kaatopaikkajätettä, minkä päälle muodostuu limainen biofilmi. Biologisella suodatuksella voidaan nitrifikoida tai denitrifikoida kaatopaikkavesiä riippuen mikrobikannasta. (Jokela, Kettunen, Sormunen ja Rintala, 2002; Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020)

Anaerobiset kantoaineprosessit toimivat myös muodostaen biofilmin kantoaineen päälle. Anaerobisessa suodattimessa biomassa säilyy biofilminä kantoaineen päällä hapettomissa olosuhteissa. Tekniikka usein yhdistetään UASB prosessin kanssa, jolloin sitä voidaan kutsua hybridipetisuodattimeksi toimien kaasun ja kiinteän aineen erottajana. (Pazoki ja Ghasemzadeh, 2020) FBR prosessissa kantoaineena on kokeiltu GAC (granular activated carbon) eli rakeista aktiivihieiltä, millä saatiin toivottu puhdistustulos poistamalla 82 prosenttia COD pitoisuudesta, mistä saatiin 99 prosenttinen metaanin tuotto. (Suidan, Schroeder, Nath, Krishnan ja Brenner, 1993)

4.5 Yhdistetyt menetelmät

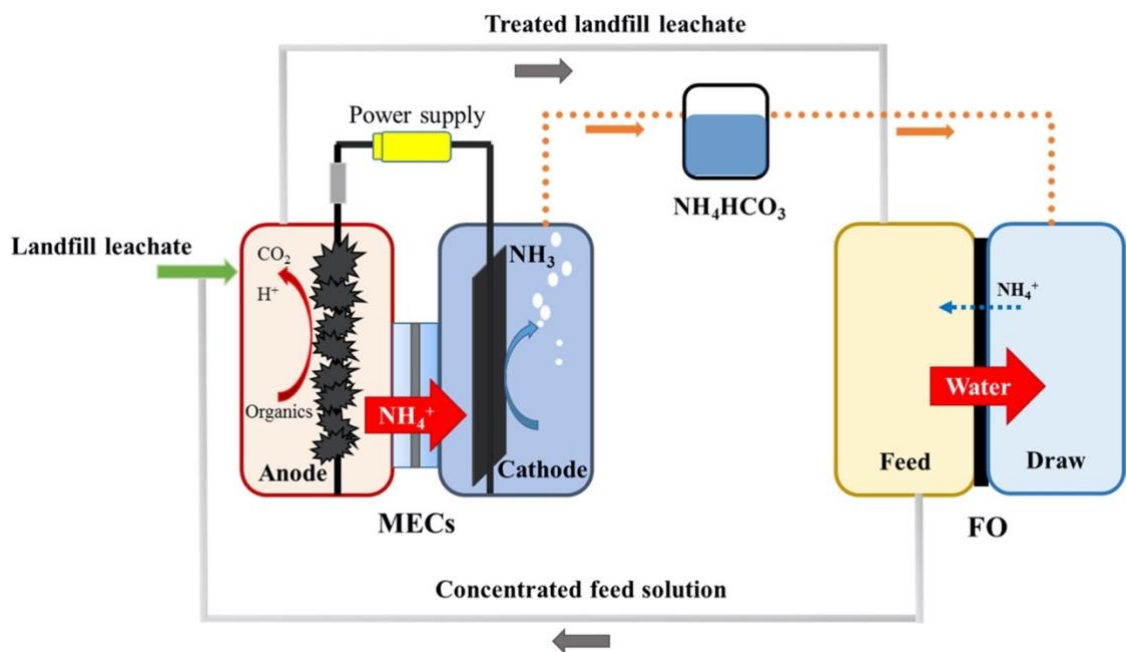
Yhdistetyt menetelmät tarkoittavat tässä työssä aiemmin esitellyistä menetelmistä koostuvia prosesseja sekä integroituja prosesseja eli yksittäisiä prosesseja, jotka yhdistävät elementtejä aiemmin mainituista kategorioista. Yhdistettyjen prosessien etuna on yksittäisten menetelmien etujen hyödyntäminen ja heikkouksien paikkaaminen, mutta usein operointikustannukset ovat korkeat. Korkeiden käyttökustannuksien takia hyödyllisten yhdisteiden talteenotto voisi parantaa kannattavuutta. Erilaisia puhdistusprosesseja on lukemattomia, joten kappaleessa tarkastellaan uudempia kaatopaikkavesiin suuntautuvia tutkimuksia.

EMB (Extractive membrane bioreactor) eli uuttava membraanibioreaktori on selektiivinen bioreaktori, perustuen polymeeriputkiston affiniteettiin ksenobiottisiin yhdisteisiin. EMB prosessi on pääosin normaali bioreaktori, mutta sen sisälle nestefaasiin on upotettu polymeeriputki, prosessikaavio on esitettyä kuvassa 4. EMB-prosessin tarkoituksena on erottaa haitalliset ksenobiottiset yhdisteet jätevedestä sekä käsitellä ne biologisesti. Hyödynnettävät ravinteet kuten rasvahapot ja ammonium taas jäävät jäteveeseen mikä voidaan ohjata talteenottoon esimerkiksi strippaus-absorptio. EMB-prosessi on kuitenkin vielä laboratorioskaalassa kaatopaikkavesien käsittelyn suhteen, eikä prosessin toimivuutta ole todettu suotovedellä vaan synteettisesti valmistetulla suotovesiliuoksella. (Mosca Angelucci, Donati ja Tomei, 2022)



Kuva 4 Tummennettu viivaa kuvastaa käsiteltävän liuoksen kulkua eli polymeeriputkistoa ja biologinen käsittely tapahtuu keltaisella pohjalla merkityssä bioreaktorissa mihin ksenobiottiset aineet kulkeutuvat aineensiirron ansiosta. (1: Syöttö; 2: Pumppu; 3: Putkisto; 4: Ulostulo ja näytteenotto; 5: Termostaatti; 6: Liuenneen hapen mittaus; 7: pH mittaus; 8: Ilmastus; 9: Bioreaktorin nestefaasi ja näytteenotto; 10: Polymeeri putkisto; 11: Magneettisekoitin; 12: NaOH liuos; 13: Pumppu; 14: Ilmakompressori; 15: Oksimetri; 16: Käyttöliittymä; 17: Tietokone). (Mosca Angelucci et al. , 2022)

BES (Bioelectrochemical systems) eli biosähkökemialliset systeemit perustuvat orgaanisten yhdisteiden hapettumiseen anodilla mikrobin toimesta ja vapautuneiden elektronien hyödyntämiseen kemikaalien tuottamiseen. (Qin, Molitor, Brazil, Novak ja He , 2016) Qin et al. (2016) suorittavat MEC (Microbial electrolysis cell) –FO (Forward osmosis) kokeita ammoniakkin talteenottoon. Prosessikuva esitettynä kuvassa 5. Prosessilla saatiin 51 % vedestä puhdistettua ja ammoniakkia saatiin talteen 66 % katodin ilmastuksella.



Kuva 5 MEC–FO systeemin prosessikaavio, missä FO käsittelyn jälkeisenä suodatuksena ja FO:n rejekti kierrätettiin takaisin MEC käsittelyyn. Vetoliuoksena käytetty ammoniumbikarbonaatti valmistetaan ilmastuksella stripatulla ammoniakilla ja ulkoisella hiilidioksidilla. (Qin et al. , 2016)

Struviitti kiteytys–AGS (aerobic granular sludge)–ANAMMOX (anaerobic ammonia oxidation) prosessi koostuu kolmesta yksiköstä tähdäten ravinteiden talteenottoon, hiilen hapettumiseen ja ammoniakkin hapettumiseen. AGS-reaktori toimii aerobisen aktiivilietteen tavoin ja ANAMMOX nitrifikaatiomikrobeilla. Podder, Reinhart ja Goel (2020) suorittivat kolmivaiheisen kokeen prosessin toimivuudesta suotoveden ja mädättämön rejektivesien liuokselle. Vaiheet koostuivat koko prosessista ilman lisättyä hiiltä, lisätyllä hiilellä ja vain AGS–ANAMMOX osuudesta lisätyllä hiilellä. COD:n ja ammoniumtypen poistotehokkuus ilman lisättyä hiiltä oli $28\pm 9\%$ ja $36\pm 11\%$. Lisätyllä hiilellä COD:n poistotehokkuus nousi yli 50 %, mutta ammoniumtypen poistotehokkuus pysyi lähes samana. (Podder, Reinhart ja Goel, 2020) Struviittikiteytyksen jälkikäsitteilyyn voitaisiin soveltaa vähemmän fosforia

ja biologisesti hajoavaa ainesta tarvitsevaa menetelmää COD:n poistoon kuten sähkökemiallisia prosesseja sekä korvata ANAMMOX strippauksella puhdistuksen parantamiseksi.

4.6 Tekniikoiden soveltuvuus kaatopaikkavesien käsittelyyn

Jätevedenpuhdistustekniikkojen kehitystasot ovat hyvin vaihtelevat kuten biologisten menetelmien, joita on sovellettu jätevedenpuhdistukseen pitkään ja käytännön toteutuksia on paljon, verrattuna sähkökemiallisiin menetelmiin, jotka edustavat uudempaa tekniikkaa. Myös vaikutus eri haitta-aineisiin vaihtelee tekniikkojen välillä, minkä vuoksi kaatopaikkavesien käsittelyyn harvoin soveltuu vain yksi käsittelyprosessi haastavan koostumuksen vuoksi. Menetelmiä jätevedenpuhdistukseen on lukuisia ja eri prosessien välisiä synergioita tai haittoja tulee tutkia sovelluskohtaisesti optimaalisen puhdistustuloksen saavuttamiseksi.

Taulukossa 4 on esitetty tiivistetysti yllä esitetyt menetelmät havainnollistamaan kokonaisvaltaisen puhdistuksen saavuttamiseen tarvittavia prosesseja. Tekniikan tasoa arvioidaan kaatopaikkavesien käsittelytoteutuksien kannalta.

Taulukko 4 Fysikaalisten, kemiallisten, sähkökemiallisten, biologisten ja integroitujen jätevedenpuhdistus menetelmien soveltuvuus kaatopaikkavesien käsittelyyn ja ravinteiden talteenottoon. Tekniikan tasoa määritetty kaatopaikkavesien näkökulmasta.

Fysikaaliset menetelmät:	Kohdeyhdisteet:	Soveltuvuus kaatopaikkavesiin	Ravinteiden talteenotto	Tekniikan taso	Haasteet
Mikrosuodatus	Kiintoaines	Heikko	-	esi-tai jälkikäsitteily	Kalvon likaantuminen, esi-tai jälkikäsitteily
Makrosuodatus	Makromolekyylit	Heikko	-	esi-tai jälkikäsitteily	Kalvon likaantuminen, esi-tai jälkikäsitteily
Nanosuodatus	Makromolekyylit, epäorgaaniset ionit	Hyvä	-	Käytännön sovelluksia	Kalvon likaantuminen, rejekti
Käänteisosmoosi (RO)	Makromolekyylit, epäorgaaniset ionit	Hyvä	-	Käytännön sovelluksia	Kalvon likaantuminen, rejekti

Fysikaaliset menetelmät:	Kohdeyhdisteet:	Soveltuvuus kaatopaikkavesiin	Ravinteiden talteenotto	Tekniikan taso	Haasteet
Suotoveden kierrätys	Orgaaninen biohajoava aines	Hyvä nuoremmille kaatopaikoille	Tehostettu metaanin tuotanto jätetäytössä: Metaani	Käytännön sovelluksia	Mahdollinen suotoveden konsentroituminen
Flotaatio	Kiintoaines, makromolekyylit	Heikko	-	-	Suolojen läsnäolo suotovesissa
Koagulaatio–flokkulaatio	Sameus, väri, kiintoaines ja COD	Heikko (kohtalainen vanhoille kaatopaikoille)	-	esi-tai jälkikäsitely	Herkkä pH-arvolle, raudan konsentroituminen
Kemialliset menetelmät:	Kohdeyhdisteet:	Soveltuvuus kaatopaikkavesiin	Ravinteiden talteenotto	Tekniikan taso	Haasteet
Kemiallinen saostus	Metallit	Heikko	Struviitti kiteytys:Fosfori , Typpi	esi-tai jälkikäsitely	Lietteen muodostuminen
Kemiallinen hapetus	COD	Kohtalainen (AOP)	-	Laboratorio- ja pilot skaala	pH säätö, kemikaali kulutus, hajoamistuotteet
Adsorptio	Heikosti hajoava orgaaninen aine ja ammonium	Kohtalainen (parempi vanhoille kaatopaikoille)	-	Käytännön sovelluksia	Adsorbentin regenerointi tarve
Strippaus	Ammonium	Heikko	Absorptio mahdollinen: Typpi	Käytännön sovelluksia	Heikko COD poisto, ilma saasteet
Sähkökemialliset menetelmät:	Kohdeyhdisteet:	Soveltuvuus kaatopaikkavesiin	Ravinteiden talteenotto	Tekniikan taso	Haasteet
Sähkökemiallinen hapetus	COD	Kohtalainen	Pelkistys anodille mahdollista: metallit, typpi	Laboratorio skaala	Katodi ja anodi materiaalin tutkiminen
Sähkökemiallinen koagulaatio	Sameus, väri, kiintoaines ja COD	Heikko (kohtalainen vanhoille kaatopaikoille)	-	Laboratorio skaala	Katodi ja anodi materiaali
Electro-Fenton	COD	Kohtalainen	-	Laboratorio skaala	pH säätö, katodi ja anodi materiaali
Integroidut menetelmät:	Kohdeyhdisteet:	Soveltuvuus kaatopaikkavesiin	Ravinteiden talteenotto	Tekniikan taso	Haasteet
EMB (Extractive membrane bioreactor)	Ksenobiottiset yhdisteet	Hyvä nuoremmille kaatopaikoille	- (Esikäsitely talteenottoon: metallit, typpi)	Laboratorio skaala	Putkisto materiaalin tutkiminen
BES (Bioelectrochemical systems)	Orgaaninen aine ja ammonium	Hyvä nuoremmille kaatopaikoille	Energia, Typpi	Laboratorio skaala	

Taulukosta 4 huomataan perinteisten menetelmien soveltuvan nuorille kaatopaikoille paremmin kohdeyhdisteiden mukaisesti, varsinkin biologiset käsittelymenetelmät ovat haasteellisia vanhojen kaatopaikkojen suotovesien huonon biohajoavuuden takia. Sähkökemialliset menetelmät soveltuvat huonon biohajoavuuden suotovesille, minkä vuoksi niiden yhdistämistä esi- tai jälkikäsittelyyn biologisten menetelmien tueksi on tutkittu. Fysikaaliset suodatusmenetelmät ovat myös hyvä vaihtoehto epäorgaanisen aineksen poistoon. Ravinteiden talteenotto on mahdollista monilla menetelmillä ja voi helpottaa erilliskäsittelyn kustannuksia. Talteenottotekniikoista yleisin on lietteen talteenotto ja hyödyntäminen jatkokäsittelyiden avulla lannoitteena.

5 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli selvittää Suomessa kunnallisten tavanomaisen jätteen kaatopaikkojen vesienhallinnan tilannetta jätevedenkäsittelytekniikoiden ja ravinteiden talteenoton kannalta. Työssä myös kartoitettiin kaatopaikkavesien käsittelyyn soveltuvia uusia ja vanhoja tekniikoita ja niiden ravinteiden talteenoton mahdollisuuksia. Lisäksi kaatopaikkavesien koostumus ja siihen vaikuttavat tekijät esiteltiin tiivistetysti. Työ oli kirjallisuuskatsaus.

Suomessa eniten käytössä oleva vesienhallintamenetelmä on kaatopaikkavesien pumppaaminen kunnalliselle jätevedenpuhdistamolle. Useissa tapauksissa pumppaaminen on taloudellisesti perusteltua. Erilliskäsittelyä oli käytössä usein pienillä kaatopaikoilla ja Pohjois-Suomessa, missä jätevedenpuhdistamolle pumppaaminen edellyttäisi pitkiä viemäriinjoja. Yleisimmät erilliskäsittelyt olivat RO-suodatus ja suotoveden kierrätys. 31:tä tutkitusta kaatopaikasta yhdeksällä oli aktiivisesti erilliskäsittely ja yhdellä ravinteiden talteenotto prosessissa.

Kaatopaikkavesien koostumus on hyvin monimutkainen ja sisältää monenlaisia haitta-aineita sekä epäpuhtauksia. Koostumus myös vaihtelee suuresti kaatopaikkojen välillä lämpötilan, kosteuden, iän ja jätteenlaadun vuoksi. Yleinen käytäntö kaatopaikkavesien

karakterisointiin on kaatopaikan iän mukaan luokittelu, vaikka kaatopaikkojen väliset erot voivat olla suuret. Haitta-aineista pitkäaikaisimmat kaatopaikan elinkaaren aikana ovat COD ja ammoniumtyppi. Ympäristölle vaarallisimpia ovat ksenobiottiset yhdisteet ja raskasmetallit. Monet tutkimukset keskittyvät COD:n ja ammoniumtyypen poistoon, sillä ne esiintyvät korkeina pitoisuuksina pitkään suotovesissä.

Uusia käsittelymenetelmiä on tutkittu paljon, joista lupaavimpia ovat sähkökemialliset ja adsorptiotekniikat vanhoille kaatopaikoille. Nuorille kaatopaikoille soveltuvat laajasti jätevedenpuhdistuksessa käytössä olevat biologiset tekniikat, mutta kaatopaikan vanhetessa biohajoavan orgaanisen aineksen määrä laskee huomattavasti ja kaatopaikkavesi voi olla haitallista prosessin mikrobikannalle ravinteiden vähäisyyden takia. Suotoveden monimutkaisen koostumuksen takia yksittäinen tekniikka harvoin on riittävä ja joudutaan esi- tai jälkikäsittelemään. Esi- ja jälkikäsitteilyyn lupaavia tekniikoita ovat erilaiset suodatukset kuten RO. RO-suodatusta voidaan myös käyttää kokonaisvaltaisena tekniikkana rejektin kierrättämisen kanssa.

Ravinteiden talteenotto on usein sivuutettu näkökulma tai toissijainen tavoite tekniikoiden arvioinnissa. Käytännön toteutukset ovat yleisesti biologisten tekniikoiden lietteen hyödyntämistä lannoitteena jatkokäsittelyn jälkeen. Huonon biohajoavuuden vuoksi vanhempien kaatopaikkojen ravinteiden talteenotto vesistä on hyvin heikolla tasolla. Kaatopaikkavesien korkea typpipitoisuus on hyvä ravinteiden lähde ja mahdollista erottaa strippaus-absorptiolla. Lupaava talteenottotekniikka struviittikiteytys tarvitsee typpeä, fosforia ja magnesiumia ja tuote on helposti hyödynnettävissä lannoitteena. Kaatopaikkavedet sisältävät kyseessä olevalle tekniikalle muita tarvittavia ravinteita, mutta fosforipitoisuus on matala, minkä vuoksi yhteiskäsittely fosforipitoisten jätevesien kuten mädättämörejektin tai elintarviketeollisuuden jäteveden kanssa on vartenotettava vaihtoehto.

Jatkotutkimuksissa olisi hyvä tutkia synergiaetuja mahdollisuuksia kaatopaikkavesien ja fosforipitoisten jätevesien yhteiskäsittelylle ravinteiden talteenoton näkökulmasta. Myös sähkökemiallisten menetelmien soveltuvuuden ja ravinteiden talteenoton kehittäminen voisi tarjota kokonaisvaltaisen ratkaisun jätevedenkäsittelyn koko kaatopaikan elinkaaren ajaksi. Olemassa olevien talteenottomenetelmien taloudellisen kannattavuuden selvittäminen olisi

tärkeää tekniikoiden eteenpäin viemisen kannalta, varsinkin ravinteiden hintojen nousun myötä.

Lähteet

ALUEHALLINTOVIRASTO:

ESAVI/1278/2020. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Topinojan jätekeskuksen ympäristöluvan muuttaminen, Turku. Päätös nro. 202/2020, Dnro. 1278/2020.

ESAVI/13736/2020. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Ämmäsuon biojätteen käsittelylaitoksen ympäristöluvan tarkistaminen ja muuttaminen, Espoo. Liite 3 perustilaselvitys 2018, Liite 6 Ämmäsuon-Kulmakorven alueen vesien yhteistarkkailu vuonna 2019, Dnro. 13736/2020

ESAVI/16372/2020. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Kujalan jätekeskuksen toiminnan ja ympäristöluvan muuttaminen, Lahti. Liitteet 2-12 raportit ja menettelyt, Dnro. 16372/2020.

ESAVI/18790/2020. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Munkkaan jätekeskuksen ympäristöluvan tarkistaminen, Lohja. Päätös nro. 97/2021, Dnro. 18790/202.

ESAVI/19264/2021. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Keltakankaan jätekeskuksen toiminnan muuttaminen ja ympäristöluvan tarkistaminen, Kouvola. Liite 17_KLJ_Keltakangas_perustilaselvitys_28052021_www, Dnro. 19264/2021 .

ESAVI/29612/2021. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Karanojan jätteiden käsittelyalueen ympäristöluvan tarkistaminen, Hämeenlinna. Hakemusasiakirjat Liite1_2_4_5_Kiertokapula_Karanoja-www, Dnro. 29612/2021.

ESAVI/31154/2021. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Suoto- ja hulevesien suodatuskäsittelyä koskevan koeluonteisen toiminnan muuttaminen, Hämeenlinna. Päätös nro 324/2021, Dnro. 31154/2021.

ESAVI/35344/2021. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Kiimassuon jätekeskuksen ympäristöluvan muuttaminen, Forssa. Liite 5 selvitys jätevesikuormituksesta viemäriin, Dnro. 35344/2021.

ESAVI/4406/2016. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2016. Kukkuroinmäen jätekeskuksen ympäristöluvassa määrätty selvitys, Lappeenranta. Päätös 301/2016/1, Dnro. 4406/2016.

ESAVI/5471/2018. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2019. Hangassuon jäteaseman toiminnan muuttaminen, Pori. Päätös nro. 222/2019, Dnro. 5471/2018.

ESAVI/5500/2015. Etelä-Suomen aluehallintovirasto, 2018. Hevossuon jäteaseman ympäristöluvan ja toiminnan olennainen muuttaminen, Rauma. Päätös nro. 85/2018/1, Dnro. 5500/2015.

ISAVI/1326/2016. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2018. Kontiosuon jätekeskuksen ympäristöluvan muutos koskien vesien johtamista ja käsittelyä, Joensuu. Päätös nro. 3/2018/1, Dnro. 1326/2016.

ISAVI/4490/2020. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Ylä-Savon jätekeskuksen ympäristöluvan nro 89/2011/1 olennainen muuttaminen ja toiminnan aloituslupa, Iisalmi. Hakemusasiakirjat, Liite 6_Vesitarkkailutulokset.pdf, Dnro. 4490/2020.

ISAVI/5519/2020. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Riikinnevan jätelaitoksen toiminnan olennainen muuttaminen, Leppävirta. Keski_savon_jätehuolto_LLKY_Riikinnevan muutoslupahakemus_liitteet_17_9_2021_www-julkaisu: Liite 7 Riikinneva jätekeskus vuosiyhteenveto 2019, Liite 1 Riikinneva ympäristölupa, Dnro. 5519/2020.

ISAVI/9091/2020. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Riikinnevan jätelaitoksen ympäristöluvan tarkistaminen jätteenkäsittelyä koskevien BAT-päätelmien vuoksi, kaatopaikka-asetuksen mukainen poikkeuslupa biohajoavaa ja muuta orgaanista ainesta sisältävän jätteen sijoittamiseksi kaatopaikalle sekä toiminnan aloittamislupa, Leppävirta. Päätös nro. 118/2020, Dnro. 9091/2020.

ISAVI/926/2018. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2018. Nousialan jäteaseman toiminnan olennainen muuttaminen koskien sekajätteen vastaanottotekniikkaa ja toiminnanaloittamislupa, Savonlinna. Päätös nro. 44/2018/1, Dnro. 926/2018.

ISAVI/9640/2020. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Heinälammirinteen jätekeskuksen ympäristöluvan tarkistaminen jätteenkäsittelyn parhaan käyttökelpoisen tekniikan päätelmien johdosta, Kuopio. Liite 1j jätekeskuksen perustila selvitys 2020, Liite 1d Vesientarkkailuohjelma 10.4.2019, Dnro. 9640/2020.

ISAVI/970/2017. Itä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Metsä-Sairilan jätekeskuksen ympäristöluvan muutos, Mikkeli. Liite 17_Metsäsairilan veloitettarkkailu_Vuosiraportti 2017_8.2.2018.pdf, Dnro. 970/2017.

LSSAVI/1024/2020. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Poikkeus biohajoavaa ja muuta orgaanista ainesta sisältävien jätteiden sijoittamiselle kaatopaikalle sekä toiminnan aloittamislupa, Mustasaari. Päätös 87/2020, Dnro. 1024/2020.

LSSAVI/16619/2020. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Dnro.16619/2020 Ab Ekorosk Oy:n Pirilön jätelaitoksen ympäristöluvan lupamääräyksen 17 mukainen teknis-taloudellinen selvitys jätteiden vastaanoton ja varastoinnin järjestämisestä, Pietarsaari. Hakemusasiakirjat, Dnro.16619/2020.

LSSAVI/17659/2021. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2021. Poikkeus biohajoavaa ja muuta orgaanista ainesta sisältävien jätteiden sijoittamiselle Tarastenjärven jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikalle, Tampere. Hakemusasiakirjat, Liite 6 Vesien tarkkailuraportti 2020, Dnro. 17659/2021.

LSSAVI/234/04.08/2011. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2015. Jätteiden hyödyntämis- tai käsittelytoiminta, ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Saarijärvi. Päätös nro. 209/2015, Dnro. 234/04.08/2011.

LSSAVI/2812/2020. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Sammakkokangas Oy:n ympäristöluvan lupamääräysten muuttaminen, Saarijärvi. Päätös nro. 255/2020, Dnro. 2812/2020.

LSSAVI/5512/2020. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Lakeuden Etappi Oy:n jätekeskuksen ympäristöluvan olennainen muuttaminen, luvan tarkistaminen jätteenkäsittelyä koskevien BAT-päätelmien johdosta sekä toiminnan aloittamislupa, Ilmajoki. Hakemusasiakirjat Liite 1 BAT-tarkastelu, Dnro. 5512/2020.

LSSAVI/5901/2018. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Mustankorkea Oy:n Mustankorkean jätekeskuksen ympäristöluvan muuttaminen sekä toiminnan aloittamislupa, Jyväskylä. Hakemusasiakirjat, Liite_7_Mustankorkean_vuosiraportti_2017, Dnro. 5901/2018.

LSSAVI/7129/2017. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2019. Ab Ekorosk Oy:n Pirilön jäteaseman toiminnan olennainen muuttaminen sekä muutetun toiminnan aloittaminen muutoksenhausta huolimatta, Pietarsaari. Päätös nro.180/2019, Dnro. 7129/2017.

LSSAVI/9220/2020. Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Jämsän kaupungin Metsä-Kivelän jätteenkäsittelyalueen toiminnan olennainen muuttaminen kaatopaikan laajennusalueen 2 osalta sekä toiminnan aloittamislupa, Jämsä. Päätös 172/2020, Dnro. 9220/2020.

PSAVI/00747/17/5107. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2019. Ympäristöluva Päätös 19/0118/3, Dnro. 00747/17/5107

PSAVI/130/04.08/2013. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2017. Majasaaren jätekeskuksen ympäristöluva, Kajaani. Päätös nro. 29/2017/1, Dnro. 130/04.08/2013.

PSAVI/185/04.08/2012. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2014. Kuusiselän kaatopaikan jätevesiselvitys, Rovaniemi. Päätös nro. 78/2014/1, Dnro. 185/04.08/2012.

PSAVI/2512/2018. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2020. Ruskon jätekeskuksen toiminnan olennainen muuttaminen ja ympäristöluvan tarkistaminen uusien BAT-päätelmien vuoksi, Oulu. Päätös nro. 82/2020, Dnro. 2512/2018.

PSAVI/344/2017. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2019. Ylivieskan jätekeskuksen ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, toiminnan olennainen muuttaminen ja luvan hakeminen erälle uusille toiminnoille sekä poikkeusluparatkaisu orgaanista ainesta koskevasta kaatopaikkakiellosta, Ylivieska. Päätös nro. 175/2019, Dnro.344/2017.

PSAVI/3853/2017. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2019. Kierrätyspuisto Residuumin toiminnan olennainen muuttaminen, ympäristöluvan tarkistaminen uusien

BAT-päätelmien vuoksi ja toiminnanaloittamislupa, Rovaniemi. Päätös nro. 122/2019, Dnro. 3853/2017.

PSAVI/6/04.08/2011. Pohjois-Suomen aluehallintovirasto, 2012. Perämeren Jätehuolto Oy:n Jätekeskus Jäkälän (entinen Riukkajängän jätteenkäsittelylaitos) ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen ja toiminnan muuttaminen, Tornio. Päätös 77/12/1, Dnro. 6/04.08/2011.

Amaral, M.C.S., Pereira, H.V., Nani, E. ja Lange L.C. 2015. Treatment of landfill leachate by hybrid precipitation/microfiltration/nanofiltration process. *Water Science and Technology* 72(2): 269-276.

Botniarosk 2020. Botniarosk Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022]. Saatavissa: <https://botniarosk.fi/fi/yritys/vuosikertomukset>

Deng, Y., Zhu, X., Chen, N., Feng, C., Wang, H., Kuang, P. ja Hu, W. 2020. Review on electrochemical system for landfill leachate treatment: Performance, mechanism, application, shortcoming and improvement scheme. *The Science of the Total Environment* 745: 140768.

dos Santos, H.A.P., de Castilhos Júnior, A.B., Nadaleti, W.C. ja Lourenço V.A. 2020. Ammonia recovery from air stripping process applied to landfill leachate treatment. *Environmental Science and Pollution Research International* 27(36): 45108-45120.

Ekokymppi 2020. Kainuun jätehuollon kuntayhtymä Ekokymppi, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.ekokymppi.fi/ekokymppi/vuosikertomukset.html>

Etelä-Karjalan jätehuolto 2020. Etelä-Karjalan jätehuolto Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://ekjh.fi/vuosikertomus-2020-ymparistovastuu/>

Huang, H., Xiao, D., Zhang, Q. ja Ding, L. 2014. Removal of ammonia from landfill leachate by struvite precipitation with the use of low-cost phosphate and magnesium sources. *Journal of Environmental Management* 145: 191-198.

HSY 2020. Helsingin seudun ympäristöpalvelut Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen, vuosikertomus 2020 [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022]. Saatavissa: <https://julkaisu.hsy.fi/ammassuon-jatteenkasittelykeskuksen-toiminta-vuonna-2020.html>

Jokela, J.P.Y., Kettunen, R.H., Sormunen, K.M. ja Rintala, J.A. 2002. Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate: low-cost nitrification in biofilters and laboratory scale in-situ denitrification. *Water Research (Oxford)* 36(16): 4079-4087.

Jätekuikko 2020. Jätekuikko Oy, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.jatekuikko.fi/vuosikertomus/ymparistovastuu.html>

Jätelaki 646/2011 Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

Kaartinen, T., Eskola, P., Vestola, E., Merta, E. ja Mroueh, U. 2009. VTT TIEDOTTEITA 2502 Uudet Jätteenkäsittelykeskusten Vesienhallintatekniikat. VTT Technical Research Center of Finland.

Kiertokaari 2020. Kiertokaari Oy, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://kiertokaari.fi/kiertokaari-oy/vuosikertomus/>

Kiertokapula 2020. Kiertokapula Oy karanoja, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://vuosikatsaus.kiertokapula.fi/2020-2/ymparistokatsaus/karanoja-hameenlinna/>

Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A. ja Christensen, T.H. 2002. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 32(4): 297-336.

Kurniawan, T.A., Singh, D., Avtar, R., Othman, M.H.D., Hwang, G.H., Albadarin, A.B., Rezakazemi, M., Setiadi, T. ja Shirazian, S. 2021. Resource recovery from landfill leachate: An experimental investigation and perspectives. *Chemosphere* 274: 129986.

Kymenlaakson jäte 2020. Kymenlaakson jäte Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.kymenlaaksonjate.fi/kymenlaakson-jate-oy/vuosikertomukset/>

Lakeuden etappi 2020. Lakeuden Etappi Oy, vuosikertomus, 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://vuosikertomus.etappi.com/artikkeli/vuosikertomus-2020/ymparistovastuu/>

Lehtoranta, S., Malila, R., Fjäder, P., Laukka, V., Mustajoki, J. ja Äystö, L. 2021. Jätevesien Ravinteet Kiertoön Turvallisesti Ja Tehokkaasti. Suomen ympäristökeskus. <http://www.syke.fi/julkaisut>: Suomen ympäristökeskus.

LHJ 2020a. Loimi-Hämeen jätehuolto Oy, loppusijoitus. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.lhj.fi/lhj-konserni/jatteenkasittely/loppusijoitus/>

LHJ 2020b. Loimi-Hämeen jätehuolto Oy Kiimassuo, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.lhj.fi/kotitaloudet/uutiset/?newsid=451&newstitle=LHJ%3An+vuosikertomus+julkaistu>

Li, H. ja Liu, H. 2021. Treatment and recovery methods for leachate concentrate from landfill and incineration: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production* 329: 129720.

Lin, C., Huang, Y. ja Hao, O.J. 1999. Ultrafiltration processes for removing humic substances: effect of molecular weight fractions and PAC treatment. *Water Research (Oxford)* 33(5): 1252-1264.

Lounais-Suomen jätehuolto 2020. Lounais-Suomen jätehuolto Oy Topinoja, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://vuosikatsaus.lsjh.fi/2020/ymparistoa-suojellen/>

Luo, H., Zeng, Y., Cheng, Y., He, D. ja Pan, X. 2020. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *The Science of the Total Environment* 703: 135468.

Metsäsairila 2020. Metsäsairila Oy, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.metsasairila.fi/vuosikertomus/ymparistovastuu.html>

Millespakka 2020. Millespakka Oy, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://www.millespakka.fi/ajankohtaista/millespakka-oy-n-vuosikertomus-2020>

Mosca Angelucci, D., Donati, E. ja Tomei, M.C. 2022. Extractive membrane bioreactor to detoxify industrial/hazardous landfill leachate and facilitate resource recovery. *The Science of the Total Environment* 806: 150892.

Mustankorkea 2020. Mustankorkea Oy, Jätteenkäsittelyalueen ympäristövaikutukset. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://mustankorkea.fi/yhteystiedotaukioloajat/mustankorkea/jatteenkasittelyalueen-ymparistovaikutukset/>

Pazoki, M. ja Ghasemzadeh, R. 2020. *Municipal Landfill Leachate Management*. Cham: Springer International Publishing.

Pelkonen, M. 2006. Kaatopaikkavesien käsittely ja tekniikan kehittämisen tarpeet. *Vesitalous* (47): 11-15.

Perämeren jätehuolto 2020. Perämeren jätehuolto Oy, vuosikertomus 2020. [verkkajulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://jakala.fi/tietoa-meista/julkaisut/>

Piirainen, E. 2022. Ympäristöpäällikkö, Ekokymppi. Kajaani. Haastattelu 28.03.2022

Podder, A., Reinhart, D. ja Goel, R. 2020. Integrated leachate management approach incorporating nutrient recovery and removal. *Waste Management (Elmsford)* 102: 420-431.

Puhas 2020. Puhas Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022]
Saatavissa: <https://www.puhas.fi/yhtio/aiemmat-vuosikertomukset/vuosikertomus-2020.html>

Qin, M., Molitor, H., Brazil, B., Novak, J.T. ja He, Z. 2016. Recovery of nitrogen and water from landfill leachate by a microbial electrolysis cell–forward osmosis system. *Bioresource Technology* 200: 485-492.

Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F. ja Moulin, P. 2008. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials* 150(3): 468-493.

Salpakierto 2020. Salpakierto Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <https://salpakierto.fi/vuosikatsaus/2020-2/>

Sammakkokangas 2020. Sammakkokangas Oy, vuosiraportti 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: <http://www.sammakkokangas.fi/fi/jatehuolto/tietoa-yrityksesta/vuosiraportit/>

Stormossen 2020. Stormossen Oy, vuosikertomus 2020. [verkkojulkaisu, viitattu: 22.03.2022] Saatavissa: https://ar2020.stormossen.fi/annual_report/vuosikertomus-2020/vedenpuhdistus/

Suidan, M.T., Schroeder, A.T., Nath, R., Krishnan, E.R. ja Brenner, R.C. 1993. Treatment of Cercla (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act) Leachates by Carbon-Assisted Anaerobic Fluidized Beds. *Water Science and Technology* 27(2): 273-282.

Tilastokeskus 2020. Suomen Virallinen Tilasto (SVT): Jätetilasto.

Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta 2014/713 Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140713>

Vieno, N. 2014. Haitalliset aineet jätevedenpuhdistamoilla -hankkeen loppuraportti. Vesilaitosyhdistyksen Monistesarja (34).

Ympäristönsuojelulaki

2014/527

Saatavissa:

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>

Liite 1: Valtioneuvoksen asetus 2014/713 pilaantumista aiheuttavat aineet (Valtioneuvoston
asetus ympäristönsuojelusta 2014/713)

Päästöt vesiin

- 1) orgaaniset halogeeniyhdisteet ja aineet, jotka vesiympäristössä voivat muodostaa sellaisia yhdisteitä;
- 2) organofosforiyhdisteet;
- 3) orgaaniset tinayhdisteet;
- 4) aineet ja valmisteet, joilla osoitetaan olevan karsinogeenisia, mutageenisia tai lisääntymiseen vaikuttavia ominaisuuksia;
- 5) pysyvät hiilivedyt ja pysyvät sekä biokertyvät myrkylliset orgaaniset aineet;
- 6) syanidit ja fluoridit;
- 7) metallit ja niiden yhdisteet;
- 8) arseeni ja sen yhdisteet;
- 9) biosidit ja kasvinsuojeluaineet;
- 10) suspendoituneet aineet;
- 11) rehevöitymistä aiheuttavat aineet, erityisesti nitraatit ja fosfaatit;
- 12) happitasapainoon epäedullisesti vaikuttavat aineet