

Lääkeainejäämät lietteiden kierrätyksessä

→ Heidi Ahkola*

FT, tutkija, Suomen
ympäristökeskus,
heidi.ahkola@ymparisto.fi

→ Päivi Fjäder

FM, tutkija, Suomen
ympäristökeskus

→ Noora Perkola

FT, johtava tutkija, Suomen
ympäristökeskus

→ Lauri Äystö

FM, tutkija, Suomen
ympäristökeskus

→ Sari Kauppi

FT, erikoistutkija, Suomen
ympäristökeskus

*Kirjeenvaihto

TIIVISTELMÄ

Yksi kiertotalouden tavoitteista on ravinteiden kierrätys. Valtaosa jäteveden sisältämistä ravinteista ja orgaanisesta materiaalista pidättyy jätevedenpuhdistamoilla lietteeseen. Lietteeseen kertyy myös lääkkeitä ja muita haitallisia aineita, jotka voivat hankaloittaa lietteen sisältämien ravinteiden hyötykäyttöä. Lietteitä hyödynnettäessä on siksi huolehdittava lopputuotteiden turvallisuudesta ja pyrittävä ennakoimaan kierrätettäviin materiaaleihin mahdollisesti liittyvät riskit. Suomessa lannoitevalmisteenä hyödynnettävä jätevesiliete tulee käsitellä siten, että lopputuote täyttää kansallisen lannoitevalmistelain vaatimukset. Hyväksytyjä käsittelytapoja ovat muun muassa mädätys, kompostointi seosmullaksi, kalkkistabilointi ja kemiallinen hapatuus. Lääkeaineiden käyttäytyminen eri käsittelyissä riippuu aineiden ominaisuuksista. Lääkeaineiden kulkeutumisesta lietetuotteiden mukana ympäristöön, niiden pysyvyydestä sekä vaikutuksista maaperään on olemassa hyvin vähän tutkimustietoa. Mallinnuksen ja laskennallisten arvioiden perusteella lääkeainejäämät saattavat kuitenkin aiheuttaa haittaa maaperäeliöille lietevalmisteita käytettäessä. Luotettavien riskinarvioiden tekeminen edellyttää lisätutkimuksia esimerkiksi lääkeaineiden haitallisuudesta maaperäeliöille ja käyttäytymisestä lietteenkäsittelyprosesseissa sekä maaperässä.

Avainsanat

Lääkeaine, liete, kompostointi, pyrolyysi, poltto, biohiili, tuhka, kiertotalous

JOHDANTO

Väestön ikääntyessä lääkeaineiden kulutus todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa, mikä lisää myös ympäristöön päätyvien lääkeainejäämien kuormaa, ellei päästöjä saada vähennettyä. Lääkeaineet päätyvät ympäristöön pääasiassa jätevedenpuhdistamoiden kautta. Osa vesiliukoisimmista yhdisteistä kulkeutuu puhdistusprosessin läpi päätyen puhdistetun jäteveden mukana pintavesiin, ja osa kiintoaineeseen pidättyvistä yhdisteistä päätyy puolestaan lietteeseen ja sitä kautta mahdollisesti maaperään lietteiden hyötykäytön seurauksena. Osa yhdisteistä saattaa myös poistua (hajota tai muuntua) jäteveden käsittelyprosesseissa. Yhdyskuntalietteeseen pidättyy myös runsaasti ravinteita (tyypeä ja fosforia) sekä orgaanista materiaalia. Lietteiden sisältämien ravinteiden hyödyntäminen ja siihen liittyvien riskien tarkastelu ovat kiertotalouden mukaisia toimenpiteitä. Näin ollen on huolehdittava sekä lietetuotteiden turvallisuudesta että pyrittävä ennakoimaan kierrätettäviin materiaaleihin mahdollisesti liittyvät riskit.

Jätevedenpuhdistamoille saapuu vettä erilaisista lähteistä, kuten kotitalouksista, teollisuudesta, kaatopaikoilta ja hulevesistä. Näiden mukana puhdistamolle päätyy ravinteiden lisäksi monenlaisia yhdisteitä, kuten lääkeaineita, jotka voivat pidättyä puhdistamolietteeseen. Puhdistamolietettä syntyy Suomessa vuosittain noin miljoona tonnia (Vieno ym. 2018). Yli 95 prosenttia jätevedessä olevasta fosforista sitoutuu puhdistusprosessissa lietteeseen (Berninger ym. 2017), koska fosfori saostetaan jätevedenpuhdistamoilla kemiallisesti rauta- tai alumiinisaostuksella (Pöyry Finland Oy 2019). Jätevesilietteiden sisältämien ravinteiden hyödyntämisellä voitaisiin vähentää epäorgaanisten lannoitteiden käyttöä, ja se palvelisi näin osaltaan kiertotalouden tavoitteita. Lietteessä metallikompleksina olevan fosforin liukoisuus on kuitenkin heikompi kuin epäorgaanisten lannoitteiden fosforin. Tällöin lietevalmisteilla saavutettava lyhytaikainen lannoitusvaikutus on heikompi kuin epäorgaanisilla lannoitteilla, mutta myös pintavesiin huuhtoutuva fosforikuorma on pienempi. Lietteen sisältämän fosforin saatavuuden kasveille on havaittu paranevan ajan myötä (Ylivainio ym. 2020).

Jätevesilietteestä valmistettujen ja maataloudessa hyödynnettujen lannoitevalmisteiden tulee täyttää lainsäädännön mukaiset laatukriteerit (Vieno ym. 2018). Jotta lannoitevalmisteen saa saattaa markkinoille, sen tulee vastata jotain kansallisen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelon nimikettä (Lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. Kansallinen tyyppi-

pinimiluettelo, konsolidoitu versio 22.II.2019, 2019). Jätevedenpuhdistamoliete on stabiiloinen ja jatkokesiteltävä ennen kuin sitä voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteena tai maanparannusaineena. Jätevesilietteen hyötykäyttöä ovat aiemmin rajoittaneet korkeat raskasmetallipitoisuudet ja taudinaiheuttajat, joille on lainsäädännössä asetettu raja-arvot. Orgaanisille haitta-aineille, joihin lääkeaineetkin kuuluvat, vastaavia raja-arvoja ei ole asetettu. Suomessa yleisimmät lietteiden esikäsittelymenetelmät ovat mädätys ja kompostointi (Konola ja Toivikko 2019). Näiden yleisesti käytössä olevien menetelmien on kuitenkin todettu vähentävän melko huonosti tiettyjen pysyvien ja ympäristölle haitallisten orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia (Marttinen ym. 2014, Fjäder 2016, Vieno 2018). Siksi näitä yhdisteitä päätyy liete- tuotteiden mukana maaperään, missä ne voivat aiheuttaa vaaraa eliöille tai haittaa ympäristölle vaikuttaen mahdollisesti muun muassa maaperän mikrobistoon. Liettevalmisteiden mahdolliset ympäristövaikutukset eivät rajoitu vain maaperään, sillä osa yhdisteistä päätyy valunnan mukana pinta- ja pohjavesiin. Jätevesilietevalmisteen levityksen seurauksena peltojen salaojista on havaittu muun muassa karbamatsepiinia ja atenololia (Lapen ym. 2008). Näin ollen jätevesilietteiden käsittelyyn tarvittaisiin uusia tehokkaampia käsittelymenetelmiä, jotta ravinteet saadaan hyödynnettyä turvallisesti eivätkä haitalliset yhdisteet päätyisi lannoitevalmisteisiin, maanparannusaineisiin tai edelleen maaperään. Muita vaihtoehtoisia toimenpiteitä voisivat olla esimerkiksi erilaisten menetelmien kehittäminen ravinteiden talteen ottamiseksi suoraan jätevedestä, lääkeaineiden päästölähteillä tehtävät vähentämiseen tähtäävät toimenpiteet tai lääkemolekyylin kehittäminen ympäristöystävällisempään suuntaan potilasturvallisuutta vaarantamatta.

LÄÄKEAINEIDEN KÄYTTÄYMINEN LIETTEENKÄSITTELYPROSESSEISSA

Suomessa yleisesti käytössä olevan mädätyksen vaikutusta lietteen lääkeainepitoisuuksiin on tutkittu varsin vähän. On kuitenkin havaittu, että mädätys pienentää joidenkin lääkeaineiden pitoisuuksia mutta ei pysty poistamaan kaikkia. Biokaasulaitokselta peräisin olevassa syötteen mädätysjännöksessä havaittiin sitä suurempia sotalolin, diklofenaakin ja atenolin pitoisuuksia, mitä suurempi osuus syöttestä oli puhdistamolietettä (Marttinen ym. 2014). Mädätyksen vaikutuksesta lietteen lääkeainepitoisuuksiin tarvitaan lisää tietoa, jotta voidaan luotet-

tavasti arvioida, päätyykö lääkeaineita näiden laitosten lopputuotteisiin.

Kompostoinnin vaikutusta lääkeainepitoisuuksiin on tutkittu jonkin verran. Kompostoinnin on havaittu pienentävän joidenkin lääkeaineiden pitoisuuksia, mutta vastaavasti kasvattavan esimerkiksi sitalopraamin ja fluoksetiinin muuntumistuotteiden pitoisuuksia (Vasskog ym. 2009). Aiemmissä tutkimuksissa on todettu, että pitoisuuksien aleneminen saattaa myös johtua ainakin osittain kompostoinnissa käytettyjen lisäaineiden aiheuttamasta laimennemisestä. Lääkeaineista erityisesti fluorikinoloniantibiootit (norfloksasiini, siprofloksasiini, ofloksasiini), tetrasykliini sekä antibakteerisena yhdisteenä käytetty triklosaani eivät oletettavasti juuri hajoa kompostoinnissa (Fjäder 2016, Vieno ym. 2018).

Lietteen orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksien vähentämiseen voidaan käyttää esimerkiksi pyrolyysiä ja polttoa. Pyrolyysissä jätevesiliete kuumennetaan matalassa happipitoisuudessa 300–800 °C:een, jolloin lopputuotteena saadaan biohiiltä. Tekniikka vaatii paljon energiaa, ja haittapuolina voivat olla myös raskasmetallien rikastuminen ja pyrolyysissä mahdollisesti muodostuvat polyaromaattiset hiilivedyt. Polttoprosessissa liete puolestaan poltetaan hapellisissa olosuhteissa 850–950 °C:een lämpötilassa. Lopputuotteena saadaan tuhkaa, jota voidaan käyttää lannoitetuotteiden valmistuksessa (Pöyry Finland Oy 2019).

Pyrolyysin on havaittu laskevan useiden orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia sekä lietteen toksisuutta (Khan 2013, Zielinska ja Oleszczuk 2016). Pyrolyysin on kuitenkin huomattu nostavan esimerkiksi parasetamolin pitoisuutta (Ylivainio ym. 2020). Tämä voi johtua siitä, että elimistöä erittyneet ja lietteeseen päätyneet parasetamolin glukuronidi- ja rikkihappokongugaatit pilkkoutuvat prosessissa takaisin parasetamoliksi.

Poltossa lämpötilat ovat niin korkeita, että sen oletetaan useimmiten riittävän poistamaan valtaosan haitallisista orgaanisista yhdisteistä. Lietteen sisältämät raskasmetallit kuitenkin rikastuvat tuhkaan, ja sitoutuneen fosforin välitön saatavuus kasveille on vain 7–9 prosenttia (Ylivainio ym. 2020). Poltossa myös menetetään lietteen sisältämä hiili, joka maahan lisättyä auttaa ylläpitämään orgaanista ainesta ja sen hyödyllisiä vaikutuksia.

Ennen kuin jätevesilietettä voi turvallisesti jatkokäyttää, tarvitaan lääkeaineiden käyttäytymisestä erilaisissa lietteen käsittelyprosesseissa vielä lisää tietoa. Käsittelyprosessissa mahdollisesti muodostuvien lääkeaineiden muuntumistuotteiden haitallisista omi-

naisuuksista ja maaperään päätyneiden yhdisteiden kulkeutumisesta ja vaikutuksista eliöihin on hyvin vähän tutkittua tietoa. Myös lääkeaineiden yhteisvaikutuksia ympäristössä tulee selvittää.

Tarpanin ym. (2020) tutkimuksessa selvitettiin lietteen mädätyksen-, kompostoinnin-, pyrolyysin- ja polton-kokonaisympäristövaikutuksia, kuten fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja prosesseihin tarvittavia resursseja. Yhtenä suurena selvitettiin eri tavoin käsiteltyjen lietteiden toksisuutta ja havaittiin, että mädätetty liete oli vähiten toksinen maaperäeliöille. Lisäksi sen levittäminen pellolle aiheutti laskennallisesti arvioituna pienimmät kokonaisympäristövaikutukset. Seuraavaksi sijoittuivat pyrolysoitu liete, poltetu liete ja kompostoitu liete (tässä järjestyksessä).

LIETTEEN HYÖDYNTÄMISEN RISKINARVIOINNISTA

Liettevalmisteiden maaperäeliöille aiheuttamaa riskiä on arvioitu Suomessa laskennallisin keinoin (mm. Åystö 2014, Vieno 2018, Ylivainio ym. 2020). Ylivainio ym. (2020) laskivat maaperän lääkeainepitoisuuksia eri aikajänneille lietevalmisteen levityksen jälkeen ja vertasivat niitä maaperässä haitattomiksi arvioituihin pitoisuuksiin (predicted no-effect concentration, PNEC_{maaperä}). Tulokseksi saatu riskiosamäärä kertoo, aiheuttaako lääkeaine riskiä maaperässä. Mahdollisesti riskiä aiheuttaville lääkeaineille laskettiin lietevalmisteen pitoisuustaso, jonka ylityksessä voidaan olettaa myös PNEC-tason ylittävän maaperässä erityisesti lietelevityksen toistuessa. Korkeimmat laskennalliset maaperäpitoisuudet havaittiin fluorikinoloniantibiooteille (norfloksasiini, siprofloksasiini ja ofloksasiini) ja triklosaanille. Riskiosamäärien tarkastelu osoitti myös, että lietevalmisteiden levityksen seurauksena 17β-estradioli, ibuprofeeni, karbamatsepiini, tetrasykliini, diklofenaakki ja metoprololi voivat aiheuttaa riskiä maaperälle. Myös muun muassa gemfibrotsiili, etinyyliestradioli, atsitromysiini ja furosemiidi voivat mahdollisesti aiheuttaa riskin maaperän eliöille lietteissä havaituilla pitoisuuksilla (McCarthy ym. 2015, Vieno ym. 2018).

Aiemmissä tutkimuksissa puolestaan on selvitetty matemaattisen mallin avulla ympäristöpitoisuuksien (PEC) maaperässä aiheuttamaa riskiä lääkeainejäämille jätevesilietevalmisteen toistuvien lisäysten jälkeen (Eriksen ym. 2009). Haitattomaksi ympäristöpitoisuudeksi oletettiin hyvin karkeasti ja teoreettisesti 10 µg/kg erilaisille hormoneille sekä syöpälääkeille (sytostaatit) ja 100 µg/kg muille lääkeaineille. Näiden pitoisuuksien alapuolella lääkeaineiden vai-

kutukset oletettiin merkityksettäomiksi. Lääkeaineen pitoisuus puhdistamolietteisessä arvioitiin puolestaan lääkeaineen myyntimäärän ja lietteen tuotantomäärän perusteella. Tutkimuksessa haitattomaksi oletetun pitoisuuden arvioitiin ylittyvän maaperässä 14 lääkeaineella (atorvastatiini, dipyridamoli, feksofenadiini, gabapentiini, karisoprodoli, klooriprotikseeni, levetirasetaami, losartaani, mesalatsiini, metoprololi, ranitidiini, siprofloksasiini, sotaloli, tetrasykliini). Näille 14 lääkeaineelle tehtiin yksityiskohtaisempi riskinarviointi, jossa PNEC_{maaperä}-arvot arvioitiin vesieliöiden PNEC-arvoista. Ennustetut ympäristöpitoisuudet maaperässä olivat matalia ja selkeästi alle PNEC_{maaperä}-arvojen. Näin ollen jätevesilietevalmisteen lisäämisen maaperään todettiin aiheuttavan maaperäeliöille vain hyvin matalan riskin.

Ympäristöriskinarviointeja tarkastellessa on kuitenkin huomioitava, että lääkeaineiden ympäristötoksisuutta on pääasiassa tutkittu vesieliöillä, sillä vesien saastuminen on perinteisemmin koettu maaperän saastumista suuremmaksi ongelmaksi. Tutkimustietoa lääkeaineiden toksisuudesta maaperäeliöille on hyvin vähän saatavilla, jolloin riskinarvioinnissa käytettävät parametrit, kuten maaperässä haitattomaksi oletettu pitoisuus PNEC_{maaperä}, pitää johtaa vesiympäristössä haitattomaksi oletetusta pitoisuudesta PNEC_{vesi} tasapainojakautumismenetelmällä (Ylivainio ym. 2020). Menetelmään liittyy kuitenkin paljon epävarmuuksia, sillä se voi aliarvioida esimerkiksi kiintoaineeseen pidäytyvien yhdisteiden aiheuttamia todellisia riskejä, kun näitä yhdisteitä sisältävää maa-ainesta päätyy suoraan maaperäeliöiden ruuansulatukseen. Silloin kun tasapainojakautumismenetelmällä arvioiti PNEC_{maaperä}-tason arvioidaan ylittyvän, tulisi riskinarviointia tarkentaa tuottamalla ekotoksisuusaineistoa maaperäeliöillä (European Commission 2003). Arvioitaessa jätevesilietepohjaisen lannoitteiden vaikutuksia maaperään tulisi toksisuustestaus toteuttaa maaperään soveltuvilla testeillä. Näin ollen maaperäriskinarviointia ja siinä käytettäviä parametreja tulisi kehittää jatkossa, jotta riskinarviointien perusteella saatavat tulokset kuvaisivat lääkeaineiden aiheuttamaa todellista riskiä.

POHDINTA

Lääkeaineet tuovat oman haasteensa kiertotalouden mukaisessa ravinnekierrätyksessä. Tutkimuksilla on pystytty osoittamaan, että näitä yhdisteitä päätyy sellaisiin jättemateriaaleihin, joita haluttaisiin hyödyntää. Tällä hetkellä yhdyskuntalietteiden käsittelymenetelmät eivät kykene poistamaan kaikkia yhdistei-

tä ja osa päätyykin lietetuotteisiin ja edelleen niiden kautta maaperään.

Jatkossa tutkimustietoa erityisesti eri tavoin käsiteltyjen lietevalmisteiden sisältämistä lääkeainejäämistä, niiden kulkeutumisesta maaperään näiden lopputuotteiden mukana sekä niiden mahdollisesti aiheuttamista ympäristövaikutuksista tarvitaan enemmän. Jo nyt tiedetään, että eräät antibiootit sekä antibakteeriset yhdisteet kulkeutuvat maaperään lietevalmisteiden mukana, mutta niiden vaikutuksia esimerkiksi maaperän mikrobistoon tai antibioottiresistenssin syntyyn ei tunneta. Yhdyskuntajätevesilietteiden hyödyntämisen ohella tulisi jatkossa selvittää kattavammin myös muita mahdollisia lääkeaineiden kulkeutumisreittejä maaperään, kuten esimerkiksi lietelannan hyötykäyttöä.

Lietetuotteisiin liittyvässä ympäristöriskinarvioinnissa on niin ikään monia epävarmuuksia. Laskennalliset menetelmät sisältävät paljon olettamuksia ja siksi riskinarvioinnin tuloksiin on suhtauduttava varauksella. Lääkeaineiden toksisuuskokeita on tehty hyvin vähän maaperäeliöillä. PNEC_{maaperä}-arvo johdetaan siksi vesieliöille havaitun arvioidun toksisuuden avulla, mikä lisää riskinarvioinnin epävarmuutta. Yleisesti ottaen lääkeaineiden kulkeutumista lietevalmisteiden mukana maaperään, säilymistä maaperässä ja kertymistä viljelykasveihin on tutkittu hyvin vähän. Lääkeaineanalytiikan toivotaan myös jatkossa kehittyvän, jotta voidaan saada tarkempi kuva siitä, millaisia yhdisteitä ja niiden muuntumistuotteita jätevesien ja lietteenkäsittelyprosessien läpi kulkeutuu.

Riittävä tutkimustieto luo pohjan erilaisten yhdisteiden käyttäytymisen ymmärtämiselle erilaisissa lietteenkäsittelyprosesseissa ja niiden aiheuttaman riskin ennustamiselle maaperässä. Yhdyskuntalietteiden sisältämien ravinteiden hyötykäyttöön liittyy tällä hetkellä paljon avoimia kysymyksiä sekä epävarmuuksia. EU:n lannoitevalmisteasetuksessa (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus EU 2019/1009) puhdistamolietepohjaiset tuotteet on jätetty kansallisen lainsäädännön piiriin. Lääkeaineiden kuorma ei todennäköisesti tule vähenemään, mikä luo paineita tehokkaampien lietteenkäsittelymenetelmien kehittämiseksi, uudenlaisten ravinteiden talteenotetekniikoiden kehitykselle, lääkeaineiden päästölähteisiin kohdennettaville vähentämistoimille tai vaihtoehtoisesti ympäristöystävällisempien lääkeainemolekyylien kehitykselle. Lääkeaineiden lisäksi yhdyskuntalieteteisiin päätyy toki muitakin pysyviä orgaanisia yhdisteitä sekä viime aikoina paljon huomioita saaneita mikromuoveja. Nämä luovat osaltaan

omat haasteensa ja paineensa lietteen sisältämien ravinteiden turvallisemmaksi hyödyntämiseksi.

Pyrolyysi ja poltto laskevat nykytutkimuksen valossa useimpien orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia, mutta toisaalta menetelmien kustannustehokkuutta olisi tarpeen arvioida. Lisäksi tarvitaan tietoa, miten tehokkaasti nämä menetelmät kykenevät hajottamaan erilaisia yhdisteitä.

SUMMARY

Pharmaceutical residues in sludge recycling

→ Heidi Ahkola*

Ph.D., researcher,
Finnish Environment Institute,
heidi.ahkola@ymparisto.fi

→ Päivi Fjäder

M.Sc., researcher,
Finnish Environment Institute

→ Noora Perkola

Ph.D., leading researcher,
Finnish Environment Institute

→ Lauri Äystö

M.Sc., researcher,
Finnish Environment Institute

→ Sari Kauppi

Ph.D., senior research scientist,
Finnish Environment Institute

* Correspondence

Nutrient recycling is one of the goals in circular economy. At waste water treatment plants, nutrients concentrate in sewage sludge. However, sludge contains also many harmful substances and active pharmaceutical ingredients (API), which may impair the recycling of the nutrients. Therefore, the quality of sludge-based products should be ensured in order to predict and minimize potential risks. Sludge must be pre-treated before application in agriculture and landscaping. Approved treatment techniques are e.g. composting, lime stabilization and chemical oxidation. The behaviour of APIs in sludge treatment depends on their characteristics. There are only few studies about the transport, persistency and effects of APIs in soil after addition of sludge-based fertilizers. According to modelling and estimations some APIs can cause risk to terrestrial organisms when sludge products are applied to soil. The main knowledge gaps, such as lack of ecotoxicological data produced on soil organisms, behaviour of APIs in sludge treatment processes and soil environment, need to be filled and more research is required before reliable risk assessments can be made.

Keywords: Active pharmaceutical ingredient (API), sludge, composting, pyrolysis, incineration, biochar, ash, circular economy

SIDONNAISUODET

Lauri Äystö: Lakeuden Troppi Oy:n osakas ja hallituksen jäsen. Lakeuden Troppi Oy:n toimialana on ei-lääkkeellisten terveydenhoitotuotteiden vähittäiskauppa. Heidi Ahkola, Päivi Fjäder, Noora Perkola, Sari Kauppi: Ei sidonnaisuuksia

KIRJALLISUUS

Berninger K, Pihl T, Kasanen P ym.: Jätevesien fosfori hyötykäyttöön – teknologioita ja ohjauskeinoja. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 62/2017

Eriksen GS, Amundsen CE, Bernhoft A ym.: Risk assessment of contaminants in sewage sludge applied on Norwegian soils. Opinion of the Panel on Contaminants in the Norwegian Scientific Committee for Food Safety. 20.8.2009

European Commission: Technical Guidance Document on Risk Assessment in support of Commission directive 93/67/EEC on Risk Assessment for new notified substances. Commission regulation (EC) No1488/94 on Risk Assessment for Existing substances, Directive 98/8/EC of the European Parliament and of the Council concerning the placing of biocidal products on the market. European Commission, Ispra 2003

Fjäder P: Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherrakentamisen riskit – RUSSOA I-III Loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43/2016

Khan S, Wang N, Reid BJ ym.: Reduced bioaccumulation of PAHs by Lactuca sativa L. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar. Environmental Pollution 175: 64-68, 2013

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

Lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. Kansallinen tyyppinimiluettelo, konsolidoitu versio 22.11.2019. Ruokavirasto, 2019 https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/yritykset/lannoiteala/tiedostot/tyypinimiluettelo_konsolidoitu_22_11_2019.pdf

Lapen DR, Topp E, Metcalfe CD ym.: Pharmaceutical and personal care products in tile drainage following land application of municipal biosolids. Science of the Total Environment 399: 50-65, 2008

Marttinen S, Suominen K, Lehto M ym.: Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 135, 2014

McCarthy LH, Loyo-Rosales JE, Raby M ym.: Risks Associated with Application of Municipal Biosolids to Agricultural Lands in a Canadian Context - Literature review. Canadian Municipal Water Consortium, Canadian Water Network. Ryerson University 2015

Tarpani RRZ, Alfonsin C, Hospido A ym.: Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products. Journal of Environmental Management, 260: 109643, 2020

Vasskog T, Bergersen O, Anderssen T ym.: Depletion of selective serotonin reuptake inhibitors during sewage sludge composting. Waste Management 29: 2808-2815, 2009

Pöyry Finland Oy: Puhdistamolietteen termiset käsittelymenetelmät ja niiden soveltuvuus Suomeen. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 56. Suomen Vesilaitosyhdistys ry, Helsinki 2019

Vieno N, Sarvi M, Salo T ym.: Puhdistamolietteen sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018, Luonnonvarakeskus, Helsinki 2018

Ylivainio K, Äystö L, Fjäder P ym.: Jätevesilietefosforin pitkäkestoinen fosforilannoitusvaikutus ja yhteys ympäristö- ja ruokaturvallisuuteen. Jätevesilietteen potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön – ja elintarvikeeturvallisuuteen (PProduct) –hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 55/2020, Luonnonvarakeskus, Helsinki. 2020 (painossa)

Zielinska A, Oleszczuk P: Effect of pyrolysis temperatures on freely dissolved polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) concentrations in sewage sludge-derived biochars. Chemosphere 153: 68-74, 2016

Äystö L: Puhdistamolietteen sisältämien orgaanisten haitta-aineiden käyttäytyminen suomalaisilla maatalousmailla. Pro gradu -tutkielma. Ympäristötieteiden laitos, Helsingin yliopisto, 2014