



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 55/2020

Jätevesilietteen pitkäkestoinen fosforilannoitusvaikutus ja yhteys ympäristö- ja ruokaturvallisuuteen

Jätevesilietteen potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön ja elintarvikeeturvallisuuteen (PProduct) -hankkeen loppuraportti

Kari Ylivainio, Lauri Äystö, Päivi Fjäder, Kimmo Suominen, Alma Lehti, Noora Perkola, Jukka Ranta, Päivi Meriläinen, Ville Välttilä ja Eila Turtola

Jätevesilietteen pitkäkestoinen fosforilannoitusvaikutus ja yhteys ympäristö- ja ruokaturvallisuuteen

Jätevesilietteen potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön ja elintarviketurvallisuuteen (PProduct) -hankkeen loppuraportti

Kari Ylivainio, Lauri Äystö, Päivi Fjäder, Kimmo Suominen, Alma Lehti, Noora Perkola, Jukka Ranta, Päivi Meriläinen, Ville Välttilä ja Eila Turtola

Viittausohje:

Ylivainio, K., Äystö, L., Fjäder, P., Suominen, K., Lehti, A., Perkola, N., Ranta, J., Meriläinen, P., Välttilä, V. & Turtola, E. 2020. Jätevesilietteen pitkäkestoinen fosforilannoitusvaikutus ja yhteys ympäristö- ja ruokaturvallisuuteen : Jätevesilietteen potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön ja elintarviketurvallisuuteen (PProduct) -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 55/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 120 s.

Kari Ylivainio, ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-3840-6554>



ISBN 978-952-380-017-5 (Painettu)

ISBN 978-952-380-018-2 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-018-2>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Kari Ylivainio, Lauri Äystö, Päivi Fjäder, Kimmo Suominen, Alma Lehti, Noora Perkola, Jukka Ranta, Päivi Meriläinen, Ville Välttilä ja Eila Turtola

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2020

Julkaisuvuosi: 2020

Kannen kuva: Kari Ylivainio

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Kari Ylivainio¹, Lauri Äystö², Päivi Fjäder², Kimmo Suominen³, Alma Lehti¹, Noora Perkola², Jukka Ranta³, Päivi Meriläinen^{2,4}, Ville Välttilä³ ja Eila Turtola¹

¹Luonnonvarakeskus (Luke), Tietotie 4, 31600 Jokioinen, etunimi.sukunimi@luke.fi

²Suomen ympäristökeskus (SYKE), Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki/Mustialankatu 3, 00790 Helsinki, etunimi.sukunimi@ymparisto.fi

³Ruokavirasto, Mustialankatu 3, 00790 Helsinki, etunimi.sukunimi@ruokavirasto.fi

⁴Nykyinen osoite: Terveysturvallisuusosasto, PL 95 (Neulamäentie 4), 70701 Kuopio, etunimi.sukunimi@thl.fi

Kiertotalouden tavoitteiden mukaisessa elintarviketuotannossa on olennaista, että ravinnerikkaat sivuvirrat hyödynnetään mahdollisimman tarkoin lannoitteina. Merkittävimmät ravinnerikkaat sivuvirrat ovat kotieläintuotannossa muodostuva lanta sekä jätevedenpuhdistuksessa muodostuva jätevesiliete. Ravinteista erityisesti fosforin kierrätys on keskeistä, koska fosfori on hupeneva luonnonvara ja se on asetettu myös EU:ssa kriittisten materiaalien listalle. Kotieläinten lantaan verraten jätevesilietteen fosforista palautuu ravinnontuotantoon ja lannoitteeksi huomattavasti pienempi osuus ja jätevesilietteen ravinteiden hyödyntäminen on puutteellista. Yhtenä syynä tähän on epätietoisuus jätevesilietteen sisältämien ravinteiden, erityisesti fosforin, lannoitusarvosta. Toinen jätevesilietteen käyttöä rajoittava tekijä on epäilty raskasmetallien ja orgaanisten haitta-aineiden siirtyminen elintarvikkeisiin ja myös vaikutukset ympäristöön.

Maa- ja metsätalousministeriön, useiden jätevedenpuhdistamoiden, yksityisten yritysten sekä vesilaitosyhdistyksen rahoittamassa hankkeessa *”Jätevesilietefosforin potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön ja elintarviketurvallisuuteen (PProduct)”* selvitettiin kasvatuskokeissa jätevesilietefosforin pitkäkestoista fosforilannoitusvaikutusta sekä raskasmetallien (Cd, Pb, Ni, As, Cr, Co) kerääntymistä ohraan ja raiheinään. Laajassa kartoituksessa selvitettiin myös PBDE-yhdisteiden esiintymistä eri puolilta Suomea kerätyissä jätevesilietenäytteissä. Kasvatuskokeilla tutkittiin orgaanisten haitta-aineiden (PBDE, lääkeaineet ja biosidit) mahdollista kerääntymistä kauraan ja raiheinään ja kokeen päätyttyä niiden pitoisuutta koemaassa. Elintarvikeriskinarvioinnissa selvitettiin puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden yhden levityskerran aiheuttama laskennallinen PBDE-pitoisuuksien nousu viljelymaassa ja yhdisteiden laskennallinen kertyminen kauraan. Ympäristöriskinarvioinnissa selvitettiin jätevesilietepohjaisten lannoitteiden vaikutusta orgaanisten haitta-aineiden (PAH, PFAA, PBDE, lääkeaineet ja biosidit) kertymiseen maaperään kahdella eri lisäystrynalla (5 t ha⁻¹ v⁻¹ ja 20 tn ha⁻¹ 5v⁻¹).

Fosforin pitkäkestoista lannoitusvaikutusta selvittämissä kasvatuskokeissa lannoitevalmisteet sisälsivät joko ainoastaan jätevesilietettä (HSY:n maanparannuskomposti, Stormossenin komposti, Kemi-cond, Biovakka Turku, pyrolysoitu HSY:n mädäte), jätevesilietettä yhdessä muiden orgaanisten sivuvirtojen kanssa (BioKymppi Oy: Peltokymppi A), jätevesilietteen tuhkaa (Endev Oy:n polttama jätevesiliete sekä tuhkat Puolasta ja Saksasta) tai sian lietelantaa ja teollisuuden biohajoavia sivutuotteita (Biovakka Vehmaa).

Kun koekasvina oli ohra, jätevesilietefosforin pidempikestoinen käyttökelpoisuus pysyi samalla tasolla välittömän eli ensimmäisen vuoden ohrasadolle määritetyn käyttökelpoisuuden kanssa. Kun koekasvina oli raiheinä, fosforin käyttökelpoisuus sen sijaan parani ensimmäisen kasvukauden edetessä ja edelleen seuraavilla kasvukausilla. Ohralle fosforin käyttökelpoisuus kolme kasvukautta kestäneessä kasvatuskokeessa oli 3–10 % ja raiheinälle (yhteensä 10 satoa) 17–38 % ainoastaan jätevesilietettä sisältäneille fosforilähteille ja parani jätevesilietteen osuuden laskiessa. Ohran heikompaan käyttö-

kelpoisuuteen vaikutti osaltaan säätekijöiden aiheuttama ensimmäisen kasvukauden heikko sato. Pyrolysoidussa mädätteessä fosforin käyttökelpoisuus oli molemmilla koekasveilla alhainen. Pyrolysoitu mädäte myös alensi samaan aikaan lisätyn superfosfaatin käyttökelpoisuutta, toisin kuin kompostoitu mädäte.

Kompostoidun ja mädätetyn jätevesilietefosforin välitön käyttökelpoisuus riippui materiaalin (Fe+Al)/P -moolisuhteesta siten, että suhteen kasvaessa käyttökelpoisuus aleni. Pidempikestoisen käyttökelpoisuuden ennusti puolestaan hyvin DGT-menetelmällä määritetty fosforin liukoisuus koemaassa. Lannoitevalmistelain mukaiset uuttoliuokset (neutraali ammoniumsitraatti, 2 %:nen sitruunahappo ja 2 %:nen muurahaishappo) sen sijaan joko yli- tai aliarvioivat fosforin käyttökelpoisuuden.

Raskasmetallien biosaatavuus sekä ohralle että raiheinälle oli alhainen jätevesilietepohjaisista fosforilähteistä, sillä huolimatta väkilannoitefosforia (superfosfaatti) suuremmista raskasmetallipitoisuuksista kasveista mitatut pitoisuudet jäivät samalle tasolle kuin superfosfaattilisen seurauksena.

Mädätetyn jätevesilietteen pyrolysointi alensi lähes kaikkia tutkittavia orgaanisia haitta-ainepitoisuuksia. Ainoastaan kahden PAH-yhdisteen (bentso(ghi)peryleeni ja indeno(1,2,3-cd)pyreeni) sekä lääkeaineista parasetamolin pitoisuus kasvoi pyrolysoinnin seurauksena. Mädätetyn jätevesilietteen kompostointi alensi PAH-yhdisteiden, lääkejäämien ja biosidien pitoisuuksia, mutta kasvatti PFAA- ja PBDE-yhdisteiden pitoisuutta Metsäpirtin maanparannuskompostissa. Kompostoinnissa käytettyjen lisäaineiden aikaansaama laimeneminen saattaa selittää osittain kompostin pienempiä pitoisuuksia. Analysoiduista PBDE-kongeneereistä BDE-209 oli pitoisuudeltaan suurin, 87–99 % kaikkien kongeneerien summapitoisuudesta. Tutkittujen 19 jätevesilietepohjaisen lannoitevalmisteen PBDE-summapitoisuudet vaihtelivat välillä 4,65–712 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (yhdessä näytteessä 3 540 $\mu\text{g kg}^{-1}$).

Jätevesilietepohjaiset lannoitevalmisteet kasvattivat kauran ja raiheinän PBDE-pitoisuuksia määritysrajan yläpuolelle ainoastaan muutamassa rinnakkaisessa näytteessä suurimmalla (300 t ha⁻¹) lietepohjaisella lannoitelisäysmäärällä. Merkittävimmän BDE-209-kongeneerin biokertyvyys kauraan oli alle määritysrajan. Biokertyvyystekijän arviointi oli epävarmaa.

Ympäristönriskinarvioinnissa PAH-yhdisteille lasketut riskiosamäärät ylittivät kolmen yhdisteen kohdalla 0,1 riskitason (merkityksettömän alhainen riski), ollen korkeimmillaan 0,26. PFAA-yhdisteille samoin kuin BDE-209- ja BDE-99-kongeneereille riskiosamäärät olivat alle 0,1. Suurimpia riskiosamäärät olivat lääkeaineille ja biosideille, ja korkeimman riskiosamäärän saavutti triklosaani (68; korkea riski jos >10).

Asiasanat: biosidit, ekotoksisuus, elintarvikeriskinarviointi, fosforin käyttökelpoisuus, jätevesiliete, lääkeaineet, orgaaniset haitta-aineet, PAH, PBDE, PFAA, pyrolyysi, raskasmetallit, ympäristöriskinarviointi

Abstract

Kari Ylivainio¹, Lauri Äystö², Päivi Fjäder², Kimmo Suominen³, Alma Lehti¹, Noora Perkola², Jukka Ranta³, Päivi Meriläinen^{2,4}, Ville Välttilä³, Eila Turtola¹

¹Natural Resources Institute Finland (Luke), Tietotie 4, 31600 Jokioinen, firstname.lastname@luke.fi

²Finnish Environment Institute (SYKE), Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki/Mustialankatu 3, 00790 Helsinki, firstname.lastname@ymparisto.fi

³Finnish Food Authority, Mustialankatu 3, 00790 Helsinki, firstname.lastname@ruokavirasto.fi

⁴Finnish Institute for Health and Welfare, Department of Health Security, P.O.Box 95, FIN-70701 Kuopio, firstname.lastname@thl.fi

Improving the utilization of nutrient-rich side-streams as fertilizers in plant production is critical for achieving a circular economy. The most abundant nutrient-rich side-streams are manure from domestic animals and municipal sewage sludge. Improving the utilization of phosphorus (P) in these side-streams is important, as P is a finite natural resource included in the EU's list of critical raw materials. A smaller fraction of the nutrients in sewage sludge is returned to crop production compared with those in manure, due to e.g., unknown fertilizer value and possible risks associated with heavy metal and organic contaminants in sewage sludges and their potential uptake by crops.

In the project “*Potential of sewage sludge phosphorus in plant production and impacts on environment and food chain (PProduct)*”, which was funded by the Finnish Ministry of Agricultural and Forestry, several wastewater treatment utilities, private companies, and the Finnish Water Utilities Association (FIWA), the long-term P fertilization effect of sewage sludge and accumulation of heavy metals (Cd, Pb, Ni, As, Cr, Co) in barley and ryegrass were studied. In a survey, the occurrence of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sewage sludges acquired from different wastewater treatment plants across Finland was evaluated. In a growth trial, potential accumulation of harmful organic contaminants (PBDEs, pharmaceuticals, biocides) in oat grain and ryegrass, and the concentrations in growth media after the experiment, were determined. In a food safety risk assessment, the change in PBDE concentration in oat grain and growth medium after a single application of sewage sludge was calculated. In an environmental risk assessment, accumulation of organic contaminants in soil after sewage sludge application at two different rates (5 and 20 t ha⁻¹ 5y⁻¹) was evaluated.

All except one of the products tested for their long-term P fertilization effect contained only sewage sludge treated with different technologies (digesting, composting, thermal hydrolyzation, kemicond-treatment, pyrolyzation, and incineration (ash originating from Finland, Poland, and Germany)) or mixed with other organic side-streams. One product contained only biodegradable industrial side-streams and pig slurry.

For barley, the long-term fertilizer effect (three growing seasons) of various P sources was similar to the short-term effect (one growing season). For ryegrass, the fertilizer effect improved as the growing season advanced and in subsequent growing seasons (total of 10 ryegrass cuts), compared with the first ryegrass cut. Long-term P utilization efficiency in fertilizer products containing sewage-sludge P was 3–10% and 17–38% for barley and ryegrass, respectively, and increased as the proportion of sewage sludge in the fertilizer product decreased. The poor P utilization efficiency of barley was partly related to low yield in the first growing season due to unfavorable weather conditions. Pyrolyzed sewage sludge was a poor P source for both crops, and also depressed the utilization efficiency of mineral P fertilizer applied at the same time, whereas this was not observed with composted sewage sludge.

The short-term P fertilizer effect of composted and digested sewage sludge was negatively correlated with its (Fe+Al)/P molar ratio. The long-term P fertilizer effect was estimated accurately from P solubility in soil analyzed with the “Diffusive Gradients in thin-Film” (DGT) -method, whereas common extraction methods (neutral ammonium citrate, 2% citric acid, 2% formic acid) either overestimated or underestimated the relative agronomic efficiency of P sources.

The bioavailability of heavy metals in sewage sludge materials to both barley and ryegrass was low. Concentrations of heavy metals in sludge-fertilized plants were similar to those in mineral P (superphosphate)-fertilized plants, despite the higher heavy metal concentrations in sewage sludge.

Pyrolyzation of digested sewage sludge decreased the concentrations of most organic contaminants analyzed, including those of two polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds (benzo(ghi)perylene and indeno(1,2,3-cd)pyrene), and one pharmaceutical (paracetamol). Composting of digested sewage sludge decreased the concentrations of PAHs, pharmaceuticals, and biocide residues, but increased the concentrations of perfluoroalkyl acids (PFAAs) and PBDEs. The lower concentrations of some organic contaminants in the compost product may be due to the dilution effect of additives used during composting. Of the PBDE congeners analyzed, BDE-209 was the most abundant, comprising 87–99% of the sum of all congeners. In the 19 sewage sludge materials tested, total PBDE concentration varied between 4.65 and 712 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (one sample containing 3540 $\mu\text{g kg}^{-1}$).

Sewage sludge-based fertilizer materials increased PBDE concentrations in oat grain and in ryegrass to above the detection limits only in a few replicates with the highest sewage sludge application rate (300 t ha⁻¹). Bioaccumulation of the most abundant PBDE congener (BDE-209) in oat grain was below the detection limit. Due to the low concentrations of other PBDE congeners in the test materials, estimation of their bioaccumulation factor was uncertain.

Risk factors determined for PAH compounds in the environmental risk assessment exceeded a value of 0.1 (low risk) for three compounds and the highest value obtained was 0.26. For PFAAs and the BDE-209 and BDE-99 congeners, the risk factor was below 0.1. The highest risk factors were found for pharmaceutical residues and biocides, with the highest value observed being 68 (high risk >10) for triclosan.

Keywords: biocide, ecotoxicology, environmental risk assessment, food risk assessment, heavy metals, organic contaminants, PAH, PBDE, PFAA, pharmaceutical residues, pyrolysis, relative agronomic efficiency, sewage sludge

Sisällys

1. Johdanto	9
2. Jätevesilietteiden fosforilannoitusvaikutus.....	10
2.1. Aineisto ja menetelmät.....	10
2.1.1. Tutkitut fosforilähteet	10
2.1.2. Kemiaalliset määritykset	10
2.1.3. Kasvatuskokeet	11
2.1.4. Inkubointikoe	12
2.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu	13
2.2.1. Alkuainepitoisuudet	13
2.2.2. Fosforin liukoisuus Hedleyn fraktioinnin mukaan	13
2.2.3. Astiakokeiden ohra- ja raiheinäsadot	15
2.2.4. Fosforin välitön käyttökelpoisuus ensimmäiselle sadolle	18
2.2.5. Fosforin käyttökelpoisuus kolmen vuoden sadoille	19
2.2.6. Fosforin käyttökelpoisuuden ennustaminen uuttoliuksilla.....	23
2.2.7. Fosforin käyttökelpoisuuden ennustaminen maa-analyyseillä	23
2.2.8. Sadon ravinnepitoisuudet	25
2.2.9. Haitallisten raskasmetallien pitoisuudet.....	27
3. Haitta-aineet jätevesilietteissä ja biosaatavuus	28
3.1. Aineisto ja menetelmät.....	28
3.1.1. Lääkeaineet ja biosidit.....	30
3.1.2. Polybromatut difenyylietterit (PBDE).....	30
3.1.3. Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)	30
3.1.4. Perfluorialkyyliyhdisteet	31
3.1.5. Kemiaalliset määritykset.....	31
3.1.6. Haitta-aineiden kertyminen kasveihin	33
3.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu	33
3.2.1. Alkuaineiden ja haitta-aineiden pitoisuudet	33
3.2.2. Astiakokeiden kaura- ja raiheinäsadot	37
3.2.3. Kaura- ja raiheinäsatojen ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet.....	38
3.2.4. Kaura- ja raiheinäsatojen orgaaniset haitta-ainepitoisuudet.....	38
3.2.5. Koemaan orgaaniset haitta-ainepitoisuudet.....	40
4. Elintarvikeriskinarviointi.....	42
4.1. Aineisto ja menetelmät.....	42
4.1.1. Lannoitevalmisteiden levitysmäärän arviointi	42
4.1.2. PBDE-pitoisuuksien laskennallinen nousu viljelymaassa	44
4.1.3. PBDE:iden biokertyvyyden määrittäminen	44

4.1.4. PBDE-yhdisteiden kertymisen mallintaminen	47
4.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu	48
4.2.1. PBDE-pitoisuuden nousu viljelymaassa	48
4.2.2. PBDE-yhdisteiden kertyminen kauraan kasvatuskokeissa	50
4.2.3. PBDE-pitoisuuden nousu kaurassa kertalevityksessä	52
5. Jätevesilietepohjaisten lannoitevalmisteiden ekotoksisuus	54
5.1. Tausta	54
5.2. Materiaalit ja menetelmät	54
5.2.1. Näytteiden uutto	54
5.2.2. Valobakteeritesti	54
5.2.3. UMU-testi	55
5.3. Tulokset ja niiden tarkastelu	56
5.3.1. Valobakteeritesti	56
5.3.2. UMU-testi	57
5.3.3. Käytettyjen testimenetelmien arviointi ja soveltuvuus lietusotteille	58
6. Ympäristöriskinarviointi	60
6.1. Aineisto ja menetelmät	60
6.2. Laskennan toteutus	60
6.3. Laskennan lähtöarvot	63
6.4. Tulokset ja tulosten tarkastelu	64
6.4.1. PAH yhdisteet	64
6.4.2. PFAA-yhdisteet	66
6.4.3. PBDE-yhdisteet	67
6.4.4. Lääkeaineet ja biosidit	69
6.4.5. Laskennan herkkyystarkastelu	71
7. Johtopäätökset	73
8. Lähdeluettelo	75

1. Johdanto

Suomen hallitus asetti vuonna 2010 tavoitteeksi tehdä maastamme ravinteiden kierrätyksen esimerkkialue vesistöihin päätyvän fosforin (P) määrän vähentämiseksi. Optimaaliseen ravinteiden kierrätykseen sisältyy sekä erilaisten ravinnerikkaiden sivuvirtojen tarkka hyödyntäminen että ravinteiden käyttö vain kasvien tarpeen mukaisesti yliannostelu välttämällä. Merkittävimmät fosforirikkaat sivuvirrat ovat kotieläinten lanta ja jätevesiliete. Lantaperäistä fosforia muodostuu vuositasona noin 17,6 miljoonaa kiloa, kun taas jätevesilietefosforin vastaava määrä on noin 4,5 miljoonaa kiloa (Ravinnelaskuri, tilanne 2.4.2020). Lanta päätyy pääsääntöisesti lannoitteeksi kotieläintilojen lähialueiden pelloille, vaikkakin sen hyödyntämistä heikentää aikaisempi ja paikoin yhä jatkuva ylilannoitus ja monien peltujen jo valmiiksi korkeat fosforipitoisuudet, jolloin fosforilannoitustarvetta ei ole, vaan lantafosfori tulisi käyttää syntyalueensa ulkopuolella (Ylivainio ym. 2014). Suomessa muodostuvasta jätevesilietteestä puolestaan maatalouteen päätyi vuonna 2016 vain 40 %, kun viherrakentamiseen käytettiin 50 % (Vilpanen & Toivikko, 2017). Jätevesilietteen maatalouskäyttöä rajoittaa osittain epätietoisuus jätevesilietteiden sisältämien ravinteiden, erityisesti typen (N) ja fosforin käyttökelpoisuudesta kasveille sekä myös huoli haitta-aineiden mahdollisesta siirtymisestä kasveihin ja sitä kautta elintarvikeketjuun. Osa haitta-aineista on ympäristössä pysyviä, jolloin ne toistuvan käytön myötä saattavat kertyä myös maaperään.

Aikaisemmassa Makeran rahoittamassa PRecover-hankkeessa tutkittiin jätevesilietefosforin lyhytkestoisista, yhden kasvukauden aikaista lannoitusvaikutusta käyttäen koekasvina ohraa (Ylivainio ym. 2019). Fosforin käyttökelpoisuus oli tutkimuksen mukaan vain noin 10 % johtuen suomalaisten jätevesilietteiden korkeista rauta- ja alumiinipitoisuuksista suhteessa fosforiin. Sen sijaan pidempikestoisesta lannoitusvaikutuksesta on vain vähän tutkimustietoa. Biokaasulaitosten käsittelyjäännösten sisältämien haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden riski elintarvikkeiden käytön turvallisuudelle ja ihmiselle arvioitiin puolestaan vähäiseksi Norjassa (Eriksen ym. 2009) ja Suomessa tehdyissä kirjallisuuteen perustuissa arvioissa (BIOVIRTA: Marttinen ym. 2013, Biosafe: Marttinen ym. 2014). Biokaasulaitokset vastaanottavat yhdyskuntalietteiden ohella usein myös muita orgaanisia materiaaleja. BIOVIRTA- ja Biosafe-hankkeissa tutkittiin biokaasulaitosten käsittelyjäännöksistä orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia (polyaromaattiset hiilivedyt (PAH), dibentso-p-dioksiinit ja -furaanit (PCDD/F), polyklooratut bifenyyliit (PCB), polybromatut difenyylietterit (PBDE), lineaariset alkyylibentseenisulfonaatit (LAS), nonyylifenolit ja nonyylifenolietoksylaatit (NP+NPEO), bis(2-ethyyliheksyyli)ftalaatti (DEHP), uuttuva orgaaninen halogeeni (AOX)), 14 eri lääkeainetta, perfluoratuut alkyylilyhdisteet (PFC), heksabromisyklododekaani (HBCD), tetrabromibisfenoli A (TBBPA). Useimpien pitoisuuksien todettiin olevan niin pieniä, etteivät ne aiheuta merkittävää riskiä elintarvikkeiden turvallisuudelle. Osan yhdisteistä todettiin kirjallisuuden perusteella joko hajoavan maaperässä melko nopeasti, tai niitä päätyy käsittelyjäännöksen mukana maaperään niin vähän, että kertyminen kasveihin tai eläinperäisiin elintarvikkeisiin arvioitiin vähäiseksi. Eräiden lääkeaineiden, palontorjunta-aineiden (PBDE) sekä PFAS-yhdisteiden osalta riskin arvioimiseksi katsottiin kuitenkin tarvittavan lisää tietoa.

Maa- ja metsätalousministeriön, useiden jätevedenpuhdistamoiden ja jätevesilietettä käsittelevien laitosten (Forssan vesihuoltoliikelaitos, Ab Stormossen Oy, Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY, Tampereen vesi, Turun seudun puhdistamo Oy, Porvoon vesi, Kouvola vesi Oy), BioKymppi Oy:n, Envor Biotech Oy:n, Biovakka Suomi Oy:n (nykyisin Gasum), Endev Oy:n ja Vesilaitosyhdistyksen rahoittamana käynnistettiin tutkimushanke *Jätevesilietefosforin potentiaali kasvintuotannossa ja vaikutukset ympäristöön ja elintarviketurvallisuuteen (PProduct)*. Hankkeessa tutkittiin jätevesilietefosforin pitkäkestoista fosforilannoitusvaikutusta kolmivuotisella astiakokeella sekä selvitettiin jätevesilietteiden sisältämien lääkeaineiden ja palonestoaineiden (PBDE) mahdollista kertymistä kasviin ja suoritettiin ympäristöriskien arviointi jatkuvan jätevesilietteiden käytön seurauksena.

2. Jätevesilietteiden fosforilannoitusvaikutus

2.1. Aineisto ja menetelmät

2.1.1. Tutkitut fosforilähteet

Hankkeessa tutkitut fosforilähteet olivat kokonaan tai osittain jätevesilietepohjaisia, tai eivät sisältäneet jätevesilietettä lainkaan (Taulukko 1). Kokonaan jätevesilietepohjaisia olivat Metsäpirtin maanparannuskomposti, Biovakka Turun biokaasulaitoksen mädäte (nykyisin Gasum Biovakka Turku), Stormossenin kompostoitu mädäte ja Kemicond-käsitelty mädäte. BioKymppi Oy:n (Kitee) valmistaman Peltokymppi A:n (mädätysjäännös) raaka-aineina olivat erilliskerätty biojäte, ruokakaupan pois-totuotteet, teuras- ja muut eläinpohjaiset jätteet (lk 3), kasvipohjaiset jätteet, kotieläinten lanta sekä puhdistamo- ja rasvalietteet. Biovakka Vehmaan (nykyisin Gasum Biovakka Vehmaa) biokaasulaitoksen mädätysjäännös (Biovakka Humusvoima) sisälsi sian lietelantaa ja teollisuuden biohajoavia sivu-tuotteita. Termokemiallisesti käsitellyistä jätevesilietteistä mukana olivat Endev Oy:n PAKU-menetelmällä (<https://www.endev.fi/paku-prosessi/>) poltettu liete joka oli peräisin Kotkan jäteve-denpuhdistamolta, ja Puolasta sekä Saksasta peräisin olevat jätevesilietteen tuhkat. Pyrolysoidun jätevesilietteen raaka-aineena käytettiin HSY:n mesofiilisesti mädätettyä lietettä. Pyrolysointi suori-tettiin Jokioisilla (Rasa ym. 2015) 300 °C:n tavoitelämpötilassa neljässä erässä ja kuiva-ainejakeet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi. Lanta- ja jätevesilietepohjaisten fosforilähteiden fosforilannoitusvai-kutusta verrattiin kaupalliseen väkilannoitefosforiin, superfosfaattiin.

Taulukko 1. Tutkittujen fosforilähteiden valmistajat, tuotteiden tyyppinimet ja valmistustavat.

Valmistaja/materiaali	Tyyppinimi	Valmistustapa
Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY)	Maanparannuskomposti	Kompostointi (noin 6–9 kk), mekaani-nen ilmastus
Biovakka Turku	Mädätysjäännös	Terminen hydrolyysiprosessi (150 °C, 3,5 bar, 20 min)
Stormossen, Mustasaaren kunta	Kompostimulta	Kompostointi (jätevesilietteen ja hake-tettujen risujen seos)
Taskilan jätevedenpuhdistamo, Oulu	Kemiallisesti hapetettu puhdistamo-liete (Kemicond maanparannusaine-O)	Kemiallisesti hydrolysoimalla hygieni-soitu ja kuivattu jätevesiliete
BioKymppi Oy, Kitee	Mädätysjäännös (Peltokymppi A)	Mesofiilinen mädätys
Biovakka Vehmaa	Mädätysjäännös (Biovakka Humusvoi-ma)	Mesofiilinen mädätys
Pyrolysoitu jätevesilietteen mädäte	-	Pyrolysointi, alhaisessa happipitoisuu- dessa, 300 °C:ssa
Endev Oy (PAKU-prosessi)	-	Mekaanisesti kuivatun jätevesilietteen poltto 850 °C:ssa
Jätevesilietteen tuhka (Puola)	-	Fosforin saostukseen käytetty FeCl ₃ :a, leijukerrosoltto, 850–920 °C
Jätevesilietteen tuhka (Saksa)	-	-

2.1.2. Kemialliset määritykset

Tutkittavat fosforilähteet ilmakeivattiin laboratoriossa vetokaapissa tai lämpökaapissa (37 °C) ja seu-lottiin astiakoetta varten 6 mm:n seulalla. Kemiallisia määrityksiä varten näytteistä jauhettiin osanäy-te (50 g) kuulamyllyllä. Näytteiden alkuainepitoisuudet määritettiin ICP-OES:llä (Thermo Jarrel Iris Advantage) kuningasvesiuuton jälkeen. Elohopea määritettiin EPA 7473 -menetelmällä ja hiili- ja typ-pipitoisuus LECO:lla (CN-2000).

Fosforin liukoisuus analysoitiin modifioidulla Hedleyn fraktioinnilla (Sharples & Moyer 2000) uuttamalla näytteitä (1:60, w:v) neljällä eri uuttoliuoksella: 2*vesi, 0,5 M NaHCO₃, 0,1 M NaOH ja 1 M HCl. Uutto-aika oli ensimmäisessä vesiuutossa 4 tuntia ja muissa uutissa 16 tuntia. Uuttojen jälkeen näytteet sentrifugoitiin (3000 g, 15 min) ja epäorgaaninen fosfori määritettiin suodatetusta (Nuclepore, 0,2 µm) ja kokonaisfosfori suodattamattomasta uutteesta autoklavoinnin jälkeen (rikkihappo/peroksidisulfaatti hajoitus 120 °C:ssa) kolorimetrisesti (Murphy & Riley 1962). Orgaaninen fosfori laskettiin kokonaisfosforin ja epäorgaanisen fosforin erotuksena. Fosforilähteiden sisältämän fosforin liukoisuus määritettiin myös Euroopan parlamentin ja neuvoston lannoitevalmistelain (N:o 2003/2003 ja 2019/1009) mukaisilla uuttoliuoksilla: 2 % muurahaishappo, 2 % sitruunahappo sekä 1 M neutraali ammoniumsitraatti-EDTA.

2.1.3. Kasvatuskokeet

Fosforilähteiden lannoitusvaikutusta tutkittiin kolmivuotisessa astiakokeessa (2015–2017) fosforiköyhällä (P-luku 2,2 mg l⁻¹) hietamaalla, joka oli peräisin vuodesta 2007 alkaen viherkesannolla ja luonnonhoitopeltona olleelta peltolohkolta. Astiakokeissa koekasveina oli ohra (lajike Elmeri) ja italian raiheinä (lajike Barmultra II). Niukasti helppoliukoista fosforia sisältävä koemaa oli samalta peltolohkolta kuin aikaisemmassa tutkimuksessa, jossa määritettiin fosforin välitön käyttökelpoisuus (Ylivainio ym. 2019). Ilmakuiva ja seulottu (14 mm) koemaa (6,5 kg) punnittiin koeastioihin ja lisättiin 7,6 g Ca(OH)₂ tavoitteena pH:n nostaminen arvoon 6,5. Tämän jälkeen 0,5 l maata seulottiin (4 mm) ohran ja 0,3 l raiheinän siementen peittämiseen ja loppumaahan lisättiin fosforia lukuunottamatta sama peruslannoitus seuraavasti (mg): typpeä ([Ca(NO₃)₂ ja NH₄NO₃: ¼ ammoniumina ja loput nitraattina) 1500, kaliumia (KCl) 2000, magnesiumia (MgSO₄) 300, rautaa (FeSO₄) 20, sinkkiä (ZnSO₄) 20, mangaania (MnSO₄) 20, kuparia (CuSO₄) 10, booria (H₃BO₃) 2 ja molybdeenä (Na₂MoO₄) 2. Rikkiä lisättiin muiden ravinneliuosten mukana 430 mg astiaa kohden.

Kaikkia fosforilähteitä lisättiin niiden sisältämän kokonaisfosforin perusteella. Lanta- ja jätevesilietepohjaisia fosforilähteitä lisättiin kaksi tasoa: 200 ja 400 mg P kg⁻¹ maata. Tällä pyrittiin varmistamaan se, että korjattava sato osuu verranteena toimivan väkilannoitteen (superfosfaatti) aikaansaaman satovastekäyrän nousevalle osalle. Superfosfaattikäsittelyssä fosforia lisättiin nousevat määrät satovastekäyrän aikaansaamiseksi: 0, 10, 25, 50, 150 ja 300 mg kg⁻¹ maata. Jätevesilietepohjaisten maanparannusaineiden (Metsäpirtin multa ja pyrolysoitu mädäte) vaikutusta väkilannoitefosforin käyttökelpoisuuteen tutkittiin käsittelyllä, jossa maanparannusaineina lisättiin kokonaisfosforia 200 mg P kg⁻¹ sekä lisäksi superfosfaattifosforia 25 mg kg⁻¹ maata. Toisena koevuotena (2016) mukaan otettiin Saksasta toimitettu jätevesilietteen tuhka, koekasvina oli ohra, ja uusi superfosfaattifosforia sisältävä verrokisarja: 0, 10, 50 ja 150 mg kg⁻¹ maata.

Ohran siemeniä kylvettiin koeastiaa kohden 25 kappaletta ja kasvusto harvennettiin 20 oraaseen yksilehtivaiheessa. Raiheinän siemeniä lisättiin koeastiaa kohden 300 mg. Koekäsittelyistä oli neljä rinnakkaista, ja koeastioiden paikat kasvatuspöydille arvottiin CycDesigN-ohjelmalla. Koeastiat sijoitettiin ulos verkkoseinäiseen katokseen ja kasteltiin deionisoidulla vedellä kasvukausien aikana.

Ensimmäisenä kasvukautena ohralle annettiin lisätyppeä 1000 mg korrenkasvun alkuvaiheessa samalla ammonium- ja nitratitypen suhteella kuin kokeen perustamisen yhteydessä. Raiheinälle annettiin NK-lannoitus ensimmäisenä kasvukautena jokaisen niiton jälkeen. Ensimmäisen ja toisen niiton jälkeen typpeä ja kaliumia annettiin 1500 mg ja kolmannen niiton jälkeen 1000 mg astiaa kohden. Ensimmäisen niiton jälkeen NK-lannoitus annettiin alusastiaan mahdollisen ravinteiden toksisuuden välttämiseksi, mutta tämä johti kuitenkin heikompaan kasvuun. Toisesta niitosta eteenpäin NK-lannoitus annettiin aina koemaan pintaan, minkä seurauksena superfosfaattiverranteiden satovasteet korreloivat paremmin koemaahan lisätyn fosforimäärän kanssa. Toisena kasvukautena ohralle annettiin lisätyppeä joko 500 tai 1000 mg astiaa kohden riippuen kasvustosta, ja raiheinälle N- ja K-

lisäysmäärät ensimmäisen, toisen ja kolmannen niiton jälkeen olivat 1500/1000 ja 1000/500 mg. Viimeisenä koevuotena sekä ohran että raiheinän kasvu oli jo heikkoa ja tästä syystä ohralle annettu tyypillisiä korrenkasvun alkuvaiheessa oli 500 mg ja raiheinälle ensimmäisen niiton jälkeinen N- ja K-lisä 500 mg. Toisen niiton jälkeen lisälannoitusta ei joko annettu lainkaan tai kasvusto sai 250 mg sekä typpeä että kaliumia. Kaliumlannoitusta säädeltiin myös edeltävinä syksyinä maanäytteille tehdyn viljavuusanalyysin perusteella.

Ohran tuleennuttua koko maanpäällinen biomassa korjattiin noin 2 cm korkeudelta maanpinnasta. Raiheinäsato korjattiin ennen tähkälletuloa noin 2 cm korkeudelta maanpinnasta. Sekä ohran että raiheinän biomassa kuivattiin 65 °C:ssa kahden vuorokauden ajan. Ohran jyväsato erotettiin tähkäpuimurilla ja määritettiin tuhannen siemenen paino. Ohran jyvä- ja olkinäytteiden sekä raiheinän typpi- ja kivennäisanalyyskejä varten näytteet jauhettiin vasaramyllyllä. Typpi määritettiin joko Kjeldahl- tai NIR-menetelmällä ja märkäpoltton (väkevä HNO_3) jälkeen kivennäisanalyysit suoritettiin ICP-OES:llä ja ICP-MS:llä. Orgaanisten fosforilähteiden aikaansaamaa ohran jyvä- ja raiheinäsatoa verrattiin superfosfaatin aikaansaamaan satovastekäyrään ja vastaavan sadon tuottamiseen tarvittava superfosfaattifosforin määrä suhteutettiin orgaanisen fosforilähteen kokonaisfosforimäärään. Ohran haitalliset raskasmetallipitoisuudet (Cd, Pb, Ni, As) analysoitiin vuosien 2015 ja 2016 sadoista ja raiheinän kohdalla ensimmäisen koevuoden sadoista (neljä niittoa) sekä vuoden 2016 ensimmäisestä sadosta.

Koeastiat säilytettiin verkkohallissa ulkolämpötilassa talven yli. Ennen toista ja kolmatta kasvukautta kasvatusastioissa oleva maa seulottiin (7 mm) keväällä ja astioissa oleva juuristo sijoitettiin takaisin koeastioiden pohjalle. Toisena ja kolmantena kasvukautena koemaa kalkittiin $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ tavoite pH:n (6,5) saavuttamiseksi. Viimeisenä koevuotena annettiin kaikkiin paitsi kontrollikäsittelyyn 10 mg P kg^{-1} maata "starttifosforina" ohran ja raiheinän kasvuunlähdon varmistamiseksi.

Ensimmäisen ja toisen kasvukauden jälkeen jokaisesta koeastiasta otettiin maanäytteet maanäyte-kairalla koeastian pinnasta astian pohjaan saakka. Näyte koostui 5-7 osanäytteestä (noin 250 g maata) ja näytteet kuivattiin 35 °C:ssa, jauhettiin (2 mm) ja määritettiin viljavuusanalyysin (Vuorinen & Mäkitie 1955) mukaiset P-, Ca-, K- ja Mg-pitoisuudet sekä pH ja johtoluku.

2.1.4. Inkubointikoe

Fosforilähteiden aikaansaamaa fosforin liukoisuuden muutosta maaperässä tutkittiin DGT-menetelmällä kahden viikon inkubointijakson päätteeksi (Ylivainio ym. 2017). Koemaa oli sama kuin astiakokeessa ja se kalkittiin $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ tavoite pH:n (6,5) saavuttamiseksi. Kalkitustarve määritettiin inkuboimalla kosteaa (70 % vedenpidätyskyvystä) koemaata (100 g) nousevien kalkkilisäysten kanssa kolmen viikon ajan tasalämpöhuoneessa (20 °C), minkä jälkeen maat ilmakeivattiin (35 °C), seulottiin ja määritettiin pH. Kalkitustarve (550 mg) maan pH:n nostamiseksi arvoon 6,5 määritettiin pH-vastekäyrästä (Ylivainio ym. 2017).

Inkubointikokeen aluksi koemaahan (300 g) lisättiin 550 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sekä eri fosforilähteinä kokonaisfosforia 200 mg kg^{-1} maata. Verranteena käytettiin superfosfaattifosforia ja vastekäyrän aikaansaamiseksi fosforia lisättiin 0, 25, 50, 100, 150, 200, 300 ja 400 mg kg^{-1} maata. Fosforilähteitä inkuboitettiin kostean (70 % vedenpidätyskyvystä) koemaan kanssa kaksi viikkoa tasalämpöhuoneessa (20 °C), minkä jälkeen maat ilmakeivattiin (35 °C), seulottiin ja määritettiin pH sekä fosforin liukoisuus DGT-menetelmällä (Ylivainio ym. 2017).

2.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu

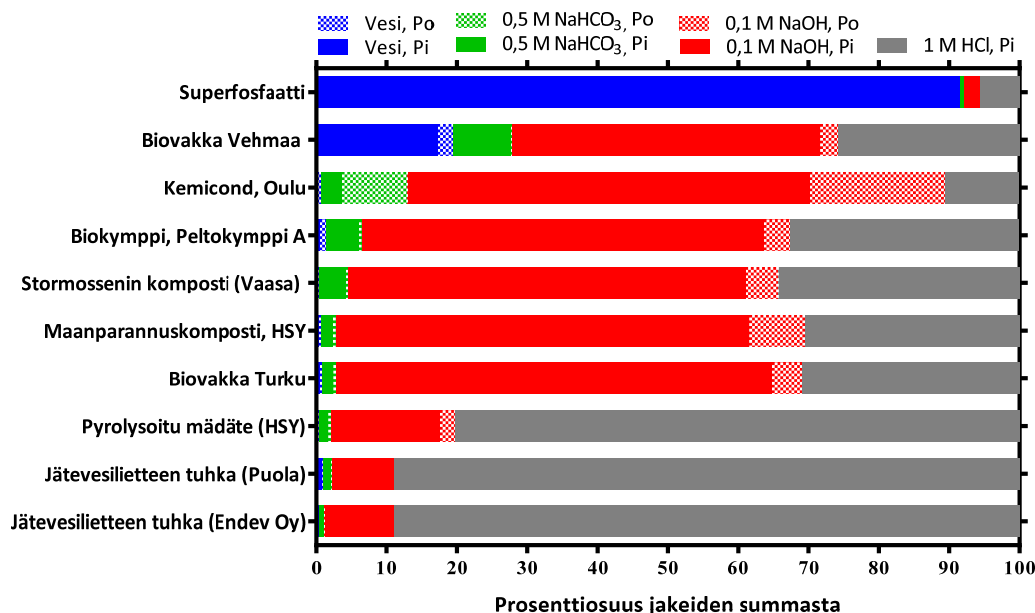
2.2.1. Alkuainepitoisuudet

Orgaanisten fosforilähteiden hiilipitoisuus oli 18,7–36,4 % (Taulukko 2). Tuhkien hiilipitoisuus vaihteli todennäköisesti johtuen erilaisista polttolämpötiloista. Jätevesilietteiden kuiva-aineen rautapitoisuus oli jopa 13 % ja fosforipitoisuus 2–3 % (pyrolysoidussa mädätteessä sekä tuhkiissa hieman korkeampi, noin 4 %) (Taulukko 2). Lietteiden typpipitoisuus oli samalla tasolla fosforipitoisuuden kanssa eikä prolysointi hävittänyt lietteen typpeä kuten poltto.

Jätevesilietteiden haitalliset raskasmetallipitoisuudet olivat alle maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa (24/11) määritettyjen raja-arvojen. Sen sijaan Puolasta ja Saksasta peräisin olevien jätevesilietetuhkien sinkki-, kadmium- ja elohopeapitoisuudet ylittivät raja-arvot, elohopeapitoisuus jopa 17-kertaisesti (Taulukko 2).

2.2.2. Fosforin liukoisuus Hedleyn fraktioiden mukaan

Hedleyn fraktioiden mukaan jätevesilietteiden fosforista vain noin prosentti oli vesiliukoista (Kuva 1). Biovakka Vehmaan mädäte ei sisältänyt jätevesilietettä ja siinä vesiliukoisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli korkeampi, 19 %. Suurin vesiliukoisen fosforin osuus, 92 %, oli kuitenkin väkilannoitefosforissa (superfosfaatti). Kasveille käyttökelpoiseen eli labiiliin jakeeseen katsotaan kuuluvan vesi- ja 0,5 M NaHCO₃ -uuttainen fosfori. Jätevesilieteteissä tämän labiilin fosforin osuus oli suurin Kemicond-lietteessä, 13 %, kun se muissa oli vain 3–6 % (Kuva 1). Lantaa sisältävässä Biovakka Vehmaan mädätteessä osuus oli 28 %. Suurimman osuuden kokonaisfosforista muodosti jätevesilieteteissä 0,1 M NaOH-uuttainen fosforijae (61–76 %), jonka katsotaan uuttavan raudan sitomaa fosforia. Toiseksi suurin fosforijae oli happouuttainen fosforijae, 11–34 %. Jätevesilietetefosforin osuudet eri jakeissa olivat samalla tasolla aikaisemman tutkimuksen kanssa (Ylivainio ym. 2019).



Kuva 1. Fosforin jakautuminen liukoisuudeltaan epäorgaanisiin (Pi) ja orgaanisiin (Po) fosforijakeisiin Hedleyn fraktioiden mukaan.

Taulukko 2. Fosforilähteiden alkuainepitoisuudet kuiva-ainetta kohden.

Fosforilähde	g kg ⁻¹										mg kg ⁻¹									
	C	P	N	K	Mg	Ca	S	Fe	Al	Cu	Zn	Mn	Mo	Co	Cr	Ni	Cd	Pb	Hg	As
Biovakka Turku	301	33,1	34,0	1,6	3,3	23,8	13,1	133	8,9	248	645	341	7,9	8,3	42,3	30,9	0,8	17,2	0,4	8,6
Kemicond (Oulu) [#]	364	17,7	40,1	0,7	1,0	3,6	12,2	58,8	20,9	132	169	54	2,2	2,5	16,9	7,1	0,3	5,9	0,3	2,5
Kemicond (Oulu) [§]	375	14,8	33,9	0,7	0,6	3,4	13,3	68,5	20,5	108	165	137	<2,0	2,0	13,0	7,0	0,3	12,5		1,7
HSY, komposti [#]	204	27,0	18,9	1,0	2,7	24,1	8,3	99,4	4,4	288	371	271	5,4	5,2	23,3	14,1	0,6	14,5	0,4	6,5
HSY, komposti [§]	291	23,3	24,4	1,3	2,4	30,1	9,7	107,5	4,0	308	458	369	2,7	6,3	26,0	20,5	1,3	23,0		2,7
Stormossen, komposti	200	26,0	20,2	4,3	5,9	46,3	17,1	79,2	23,2	193	561	585	9,9	9,0	33,9	24,1	0,6	15,9	0,4	3,4
PeltoKymppi A (Biokymppi)	316	33,3	32,7	17,3	3,9	42,7	10,2	61,6	15,0	233	519	1432	4,8	5,5	26,1	19,7	0,9	11,9	0,4	1,7
Biovakka Vehmaa	187	18,6	22,1	4,1	5,6	13,1	14,7	24,3	7,3	49	277	239	3,3	1,8	13,0	14,1	0,1	2,2	0,03	0,8
Pyrolysoitu mädäte (HSY) [#]	293	41,6	36,4	1,7	4,0	42,6	9,0	134,2	7,2	510	675	398	9,0	6,3	40,1	23,0	0,9	21,6	0,05	6,6
Pyrolysoitu mädäte (HSY) [§]	269	45,2	29,7	1,9	4,7	43,4	8,3	146	7,1	515	665	565	8,5	7,0	39,0	26,5	0,9	16,5		4,2
Jätevesilietteen tuhka 1 (Suomi)	8,0	38,8	1,0	3,2	4,8	51,5	2,0	113,8	10,7	224	578	521	12,2	10,1	51,7	44,0	0,6	15,7	0,01	5,8
Jätevesilietteen tuhka 2 (Puola)	60,6	39,4	1,6	6,4	8,7	48,8	132,9	26,9	10,8	264	1828	324	7,8	9,6	28,7	23,7	3,1	50,2	16,9	6,5
Jätevesilietteen tuhka 3 (Saksa)	1,5	107,5	-	13,5	25,3	126	5,5	94,9	24,5	645	3510	1165	32,5	21,5	74,0	57,5	6,2	28,0		16,5
Superfosfaatti	0,9	92,8	2,8	2,5	5,9	175	113,3	1,9	2,4	126	105	199	0,5	2,3	7,6	1,7	1,3	5,3	<0,01	1,1

[#]Fosforin käyttökelpoisuuskokeissa käytetty maanparannuskomposti, [§]haitta-aineiden biosaatavuus kokeissa (Luku 3) käytetty maanparannuskomposti

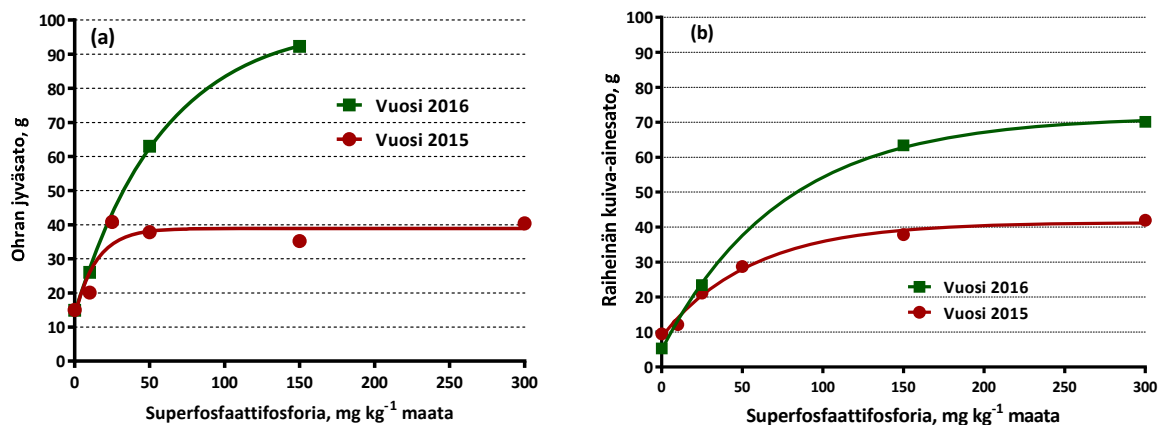
Pyrolysointi ja poltto alensivat NaOH-uuttoisen fosforijakeen osuutta, mutta kasvattivat vastaavasti happouuttoista fosforijaetta (Kuva 1). Myös aikaisemmassa tutkimuksessa lämpökemialliset käsittelyt (torrefiointi ja märkähiilto) vaikuttivat vastaavalla tavalla fosforin liukoisuuteen (Ylivainio ym. 2019).

Orgaanisen fosforin osuus kokonaisfosforista oli pieni Kemicond-lietettä lukuunottamatta (Kuva 1). Varsinkin Kemicond-lietteen NaHCO_3 -uuttoisesta jakeesta suurin osa (76 %) oli orgaanisessa muodossa ja fraktioiden yhteenlasketusta kokonaisfosforipitoisuudestakin 9,3 %, kun osuus muilla fosforilähteillä oli korkeintaan 0,4 %. Myös NaOH uuttoisesta fosforijakeesta orgaanisen fosforin osuus oli tällä lietteellä 25 %, kun se muissa fosforilähteissä oli enimmillään 8 %.

2.2.3. Astiakokeiden ohra- ja raiheinäsadot

Kolmena kasvukautena (2015–2017) korjattiin kaikkiaan kolme ohrasatoa ja 11 raiheinäsatoa. Kahtena ensimmäisenä kasvukautena raiheinästä korjattiin neljä ja viimeisenä kolme satoa. Viimeisenä vuonna 2017 typen saanti rajoitti raiheinän kolmatta satoa (Liite 7), ja tästä syystä viimeisen koevuoden sadoista ainoastaan kaksi ensimmäistä otettiin huomioon laskettaessa fosforin käyttökelpoisuutta.

Vuoden 2015 kesä- ja heinäkuun keskilämpötilat olivat viisivuotiskauden 2012–2016 alhaisimmat (<https://ilmatieteenlaitos.fi/>), mikä saattaa selittää vuoden 2015 pieniä ohrasatoja verrattuna vuoden 2016 (Kuvat 2 ja 3) ja aikaisemman kokeen (vuodet 2012–2014) ohrasatoihin (Ylivainio ym. 2019). Vuonna 2015 suurimman superfosfaattilisäyksen (300 mg P kg^{-1}) aikaansaama jyväsato oli 40,4 g, kun se seuraavana vuonna samoissa koeastioissa oli 69,5 g. Keväällä 2016 (Liite 21) aloitetussa superfosfaattiverranteessa (150 mg P kg^{-1}) sato oli puolestaan 92,3 g (Kuva 2). Vuoden 2017 kesä-heinäkuun keskilämpötilat olivat samalla tasolla kuin vuonna 2015, mutta vuonna 2017 heikot sadot (Liite 7) olivat jo seurausta fosforin puutoksesta.



Kuva 2. Ohrasato (a) ja ensimmäinen raiheinäsato (b) superfosfaattikäsittelyssä vuosina 2015 ja 2016. Molempina vuosina fosforilisä annettiin ennen kylvöä.

Heikosta sadontuotosta johtuen ensimmäisenä koevuonna (2015) ohra saavutti 90 % maksimisadosta jo fosforilisällä 27 mg kg^{-1} , kun siihen vuonna 2016 vaadittiin 123 mg kg^{-1} (Kuva 2) ja aikaisemmassa tutkimuksessa 110 mg P kg^{-1} (Ylivainio ym. 2019). Varsinkin heppoliukoisten fosforilähteiden kohdalla (Peltokymppi A, Biovakka Vehmaa) jo pienempi fosforilisä tuotti maksimisadon. Heikoiten ohrasatoa kasvattivat Biovakka Turun mädäte sekä pyrolysoitu mädäte (Liite 1).

Varsinainen fosforin puutos alkoi alentaa ohrasatoja merkittävästi toisena ja kolmantena koevuotena ja samoin pieneni sadon laatua kuvaava tuhannen siemenen paino (Liite 1). Jätevesilietepohjaisilla fosforilähteillä ensimmäisen vuoden ohrasato vastasi yleensä yli puolta kolmen vuoden yhteenlaske-

tuista jyväsadoista. Tutkituista fosforilähteistä parhaiten ohrasatoa ylläpiti Biovakka Vehmaan mädäte, jonka suuremmalla fosforilisällä (400 mg P kg^{-1}) ensimmäisen vuoden jyväsadon osuus oli 39 % kolmen vuoden yhteenlasketuista jyväsadoista. Vastaava osuus suurimmalla superfosfaattilisällä oli 30 %. Viimeisenä koevuotena Biovakka Vehmaan mädätteen (400 mg P kg^{-1}) aikaansaama jyväsato oli suurempi kuin suurimmalla superfosfaattilisällä (Liite 1).

Maanparannuskompostin ja pyrolysoidun mädätteen mukana lisätty väkilannoitefosfori kasvatti ohrasatoa eniten ensimmäisenä koevuotena (Liite 1). Maanparannuskomposti tuotti suuremman ohrasadon kuin pyrolysoitu mädäte fosforilisällä 200 mg kg^{-1} maata (Liite 1), mutta väkilannoitefosforilisä (25 mg kg^{-1}) nosti ohrasadot samalle tasolle. Pyrolysoidun mädätteen kohdalla ohrasato jäi kuitenkin pienemmäksi kuin vastaavalla superfosfaattilisällä yksinään. Tulos viittaa siihen, että pyrolysoitu mädäte alensi superfosfaattifosforin käyttökelpoisuutta ohralle. Myös maanparannuskompostin kohdalla väkilannoitefosforilisä kasvatti ohrasatoa, vaikkakaan ei yhtä paljon kuin pyrolysoidun mädätteen kohdalla. Ohrasato oli kuitenkin pelkällä maanparannuskompostilisällä lähellä maksimisatoa, joten maanparannuskompostin vaikutusta väkilannoitefosforin käyttökelpoisuuteen on vaikeampi tulkita.



Kuva 3. Ohrakasvustot superfosfaattiverranteissa vuonna 2015. Fosforilisät vasemmalta lukien: 0, 10, 25, 50, 150 ja 300 mg kg^{-1} maata. Kuva: Kari Ylivainio.

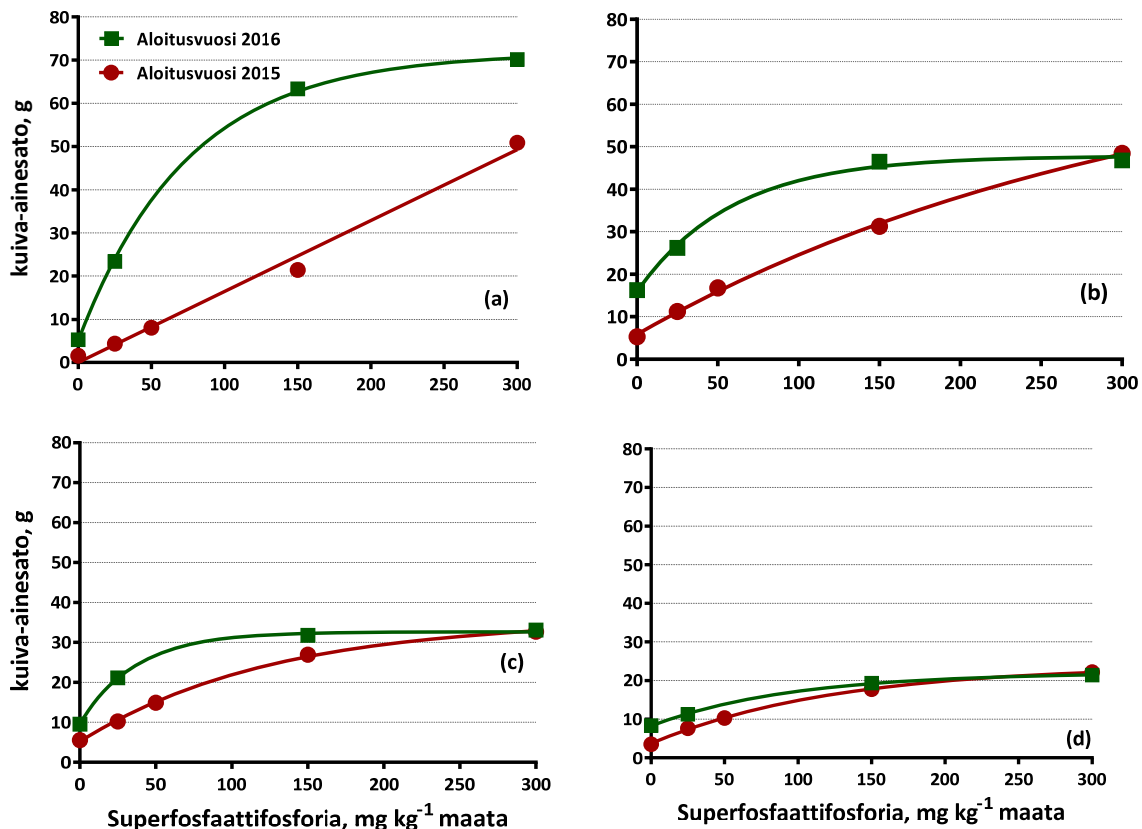
Kuten ohralla myös raiheinällä suurimman superfosfaattilisän saanessa käsittelyssä ensimmäisen niiton sato oli pienempi vuonna 2015 (42,0 g) kuin vuonna 2016 (50,9 g). Samoin keväällä 2016 perustetun suurimman superfosfaattilisän (300 mg P kg^{-1}) raiheinäsato oli suurin, 70,1 g (Liite 25). Ilman fosforilannoitusta raiheinäsadot alenivat merkittävästi toisena ja kolmantena koevuotena (Kuva 4, Liite 7). Raiheinän itäminen oli huomattavasti ohraa hitaampaa ja ensimmäinen niitto suoritettiin 52, 55 ja 60 vuorokautta kokeen kylvöstä vuosina 2015, 2016 ja 2017.

Raiheinästä korjattiin useita satoja kasvukauden aikana, jotta voitiin seurata fosforin saatavuuden muutoksia ajan kuluessa. Kun ohralla aktiivinen ja sadon määräävä ravinteiden otto tapahtuu kesäheinäkuun aikana, raiheinän kasvu jatkuu huomattavasti pitempään. Tässä kokeessa viimeinen raiheinäsato korjattiin kahtena ensimmäisenä koevuotena 25.9. ja raiheinän juuristo oli tällöin selvästi vahvempi kuin ohralla. Juuriston tiheyden merkitys fosforin saantiin tulee esiin verrattaessa keväällä 2015 ja 2016 aloitettujen superfosfaattiverranteiden raiheinäsatoja kesällä 2016 (Kuva 5). Satoerot niittojen välillä pienenevät kasvukausien edetessä ja viimeisessä niitossa satovastekäyrät olivat lähes identtisiä (Kuva 5).



Kuva 4. Raiheinäkasvustot superfosfaattiverranteissa ennen ensimmäistä niittoa vuonna 2016 (vasemmalla) ja 2017 (oikealla). Käsittelyt vasemmalta oikealle: kontrolli (ei P-lisää), 10, 25, 50, 150 ja 300 mg P kg⁻¹ koemaata kohden. Fosforilisä oli annettu vain keväällä 2015. Kuva: Kari Ylivainio.

Orgaanisista fosforilähteistä Biovakka Vehmaan mädäte kasvatti eniten raiheinän ensimmäisen niiton satoa ja raiheinäsadot olivat samalla tasolla kuin kahdella suurimmalla superfosfaattilisällä (Liite 7). Ensimmäisen niiton raiheinäsadot tutkituilla fosforilähteillä olivat suurimmasta pienimpään: Biovakka Vehmaan mädäte >> Peltokymppi A = Kemicond = jätevesilietteen tuhka (Puola) > Stormossenin komposti = Biovakka Turun mädäte = Metsäpirtin multa > pyrolysoitu mädäte = jätevesilietteen tuhka (Suomi; Endev Oy). Yksittäisten koevuosien kokonaissadot samoin kuin kaikkien koevuosien yhteenlasketut sadot noudattivat samaa järjestystä.



Kuva 5. Raiheinäsadot kasvukauden 2016 ensimmäisessä (a), toisessa (b), kolmannessa (c) ja neljännessä (d) niitossa vuonna 2016, kun astiakoe oli aloitettu joko keväällä 2015 tai keväällä 2016.

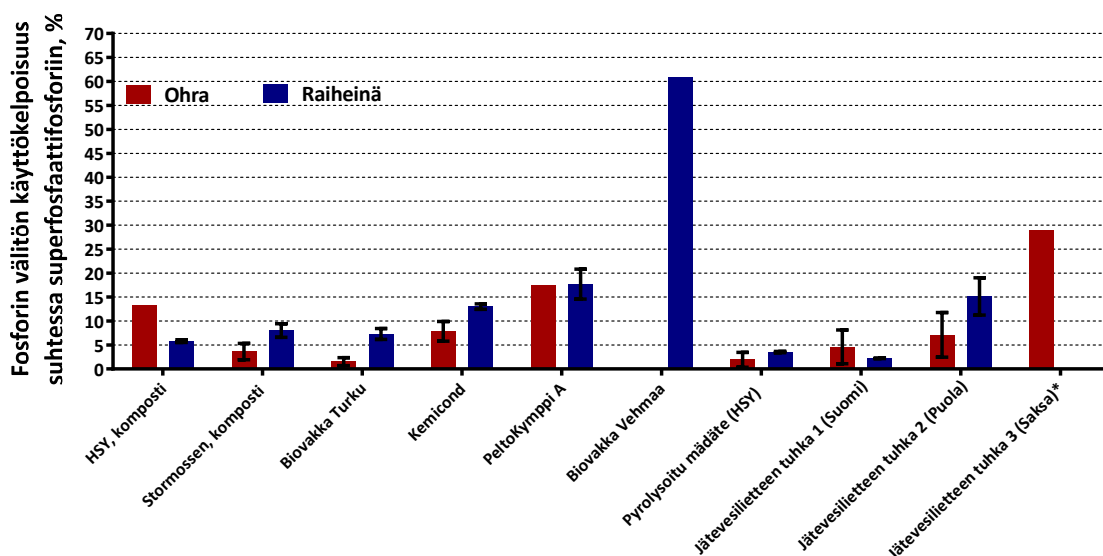
Myös raiheinän kohdalla superfosfaattilisa yhdessä maanparannuskompostin ja pyrolysoidun mädätteen kanssa tuotti suuremman sadon kuin orgaaniset fosforilähteet yksinään. Ero oli tilastollisesti merkitsevä kuitenkin vain pyrolysoidun mädätteen kohdalla ensimmäisessä sadossa vuonna 2015.

2.2.4. Fosforin välitön käyttökelpoisuus ensimmäiselle sadolle

Mädätetyn ja kompostoidun jätevesilietefosforin välitön käyttökelpoisuus ensimmäisille ohran ja raiheinän sadoille oli keskimäärin 7 ja 9 %. Välitön käyttökelpoisuus Peltokymppi A -lannoitevalmisteessa (BioKymppi Oy) oli korkeampi, 17 % ohralle ja 18 % raiheinälle. Sian lietelantaa ja teollisuuden sivuvirtoja sisältävässä Biovakka Vehmaan mädätteessä välitön käyttökelpoisuus oli paras, raiheinälle 61 % (Kuva 6). Biovakka Vehmaan aikaansaamat ohrasadot olivat pienimmälläänkin fosforilisällä superfosfaattifosforin satovastekäyrän yläosilla, joten ohralle ei voitu määrittää fosforin välitöntä käyttökelpoisuutta.

Lämpökemialliset käsittelyt alensivat jätevesilietefosforin käyttökelpoisuutta. Pyrolysoidun mädätteen sisältämän fosforin välitön käyttökelpoisuus ohralle ja raiheinälle oli 2 ja 4 %, mikä vastasi aikaisempien tutkimusten tulosta torrefioidulle ja HTC-käsitellylle jätevesilietteelle (Ylivainio ym. 2019). Jätevesilietteen tuhkan (Tuhka 1, Suomi) fosforilannoitusvaikutus oli sama kuin pyrolysoidun mädätteen. Sen sijaan sekä Puolasta että Saksasta toimitetun tuhkan käyttökelpoisuus oli parempi (Kuva 6), johtuen todennäköisesti alhaisemmasta rautapitoisuudesta suhteessa fosforiin (Taulukko 1). Saksasta toimitetun tuhkafosforin käyttökelpoisuus määritettiin ainoastaan ohralla ja koe aloitettiin vuonna 2016.

Ensimmäisenä koevuotena (2015) ohran satotaso oli huomattavasti alhaisempi ja maksimisatoon vaadittava fosforilisä oli huomattavasti pienempi kuin vuonna 2016 (Kuva 2). Tästä syystä osalla fosforilähteistä suurempaa fosforilisää ei voitu käyttää käyttökelpoisuuden laskemiseen vuonna 2015, koska sadot (Liite 1) olivat satovastekäyrän tasaisella alueella. Vuoden 2016 korkeammat sadot johtuivat lämpimämmästä kasvukaudesta. Tämä saattaa osittain selittää myös Saksasta toimitetun tuhkan paremman fosforin välittömän käyttökelpoisuuden, sillä raudan ja alumiinin moolimäärä suhteessa fosforin vastaavaan oli samalla tasolla Puolasta tuodun tuhkan kanssa (Taulukko 1).

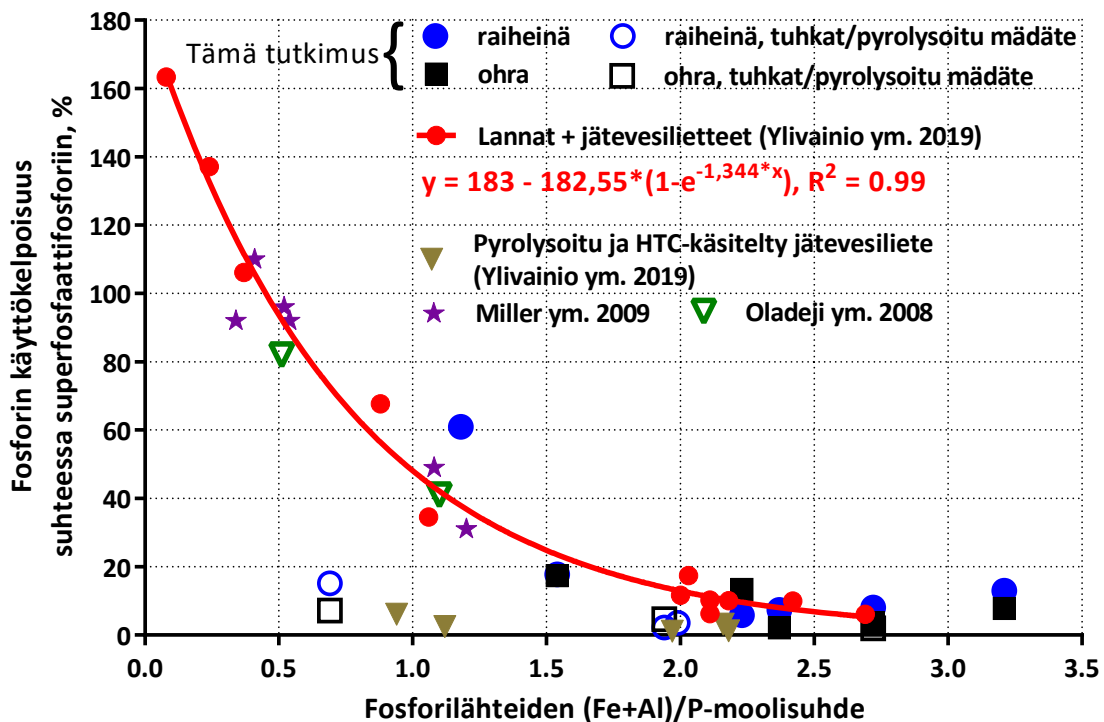


Kuva 6. Fosforilähteiden välitön käyttökelpoisuus ensimmäiselle sadolle vuonna 2015. Kuvaan on merkitty keskihajonta niille käsittelyille, joissa molempien P-lisäysten sadot voitiin hyödyntää fosforin käyttökelpoisuuden laskemiseen. *Fosforin käyttökelpoisuus määritetty vuonna 2016.

Maanparannuskomposti ja pyrolysoitu mädäte heikensivät samaan aikaan lisätyn väkilannoitefosforin välitöntä käyttökelpoisuutta raiheinälle. Sekä maanparannuskompostin että pyrolysoitun mädätteen (200 mg P kg^{-1}) ja superfosfaatin (25 mg P kg^{-1}) yhteiskäytöllä saavutettiin yhtä suuri raiheinäsaato kuin pelkällä superfosfaatilla (25 mg P kg^{-1}). Koska raiheinäsadot olivat pienempiä kuin pelkästään superfosfaatillisella, maanparannuskomposti ja pyrolysoitu mädäte alensivat samaan aikaan lisätyn väkilannoitefosforin käyttökelpoisuuden 53 ja 59 %:iin, kun se oli superfosfaatilla yksinään tässä tarkastelussa 100 %.

Kompostoidun ja mädätetyn jätevesilietefosforin välitöntä käyttökelpoisuutta selitti hyvin niiden raudan ja alumiinin moolisuhde suhteessa fosforin moolisuhteeseen (Kuva 7). Vastaavuus oli ohralla samanlainen kuin aikaisemmassakin tutkimuksessa (Ylivainio ym. 2019) ja vain Biovakka Vehmaan mädätteen kohdalla fosforin välitön käyttökelpoisuus oli parempi kuin moolisuhde antoi olettaa (Kuva 7). Myös Yhdysvalloissa suoritetuissa tutkimuksissa (Oladeji ym. 2008; Miller & O'Connor 2009) fosforin oton perusteella laskettu fosforin käyttökelpoisuus ja fosforilähteiden Fe+Al/P –moolisuhde noudatti tässä ja aikaisemmassa tekemässämme tutkimuksessa (Ylivainio ym. 2019) havaittua riippuvuutta (Kuva 7). Yhdysvaltalais tutkimuksissa lyhytkestoisen fosforilannoitusvaikutuksen kuvaamiseen käytettiin neljän (Miller & O'Connor 2009) tai kuuden (Oladeji ym. 2008) nurmisadon fosforinottoa.

Lämpökemiallisesti käsitellyissä lietteissä (pyrolysointi, tuhkat) fosforin käyttökelpoisuus oli huono ja raudan+alumiinin ja fosforin moolisuhteen muutokset eivät vaikuttaneet fosforin käyttökelpoisuuteen (Kuva 7).



Kuva 7. Fosforilähteiden välitön käyttökelpoisuus ohralle ja raiheinälle ja yhteys fosforilähteiden (Fe+Al)/P –moolisuhteeseen tämän tutkimuksen ja aikaisempien tutkimusten kasvatuskokeissa.

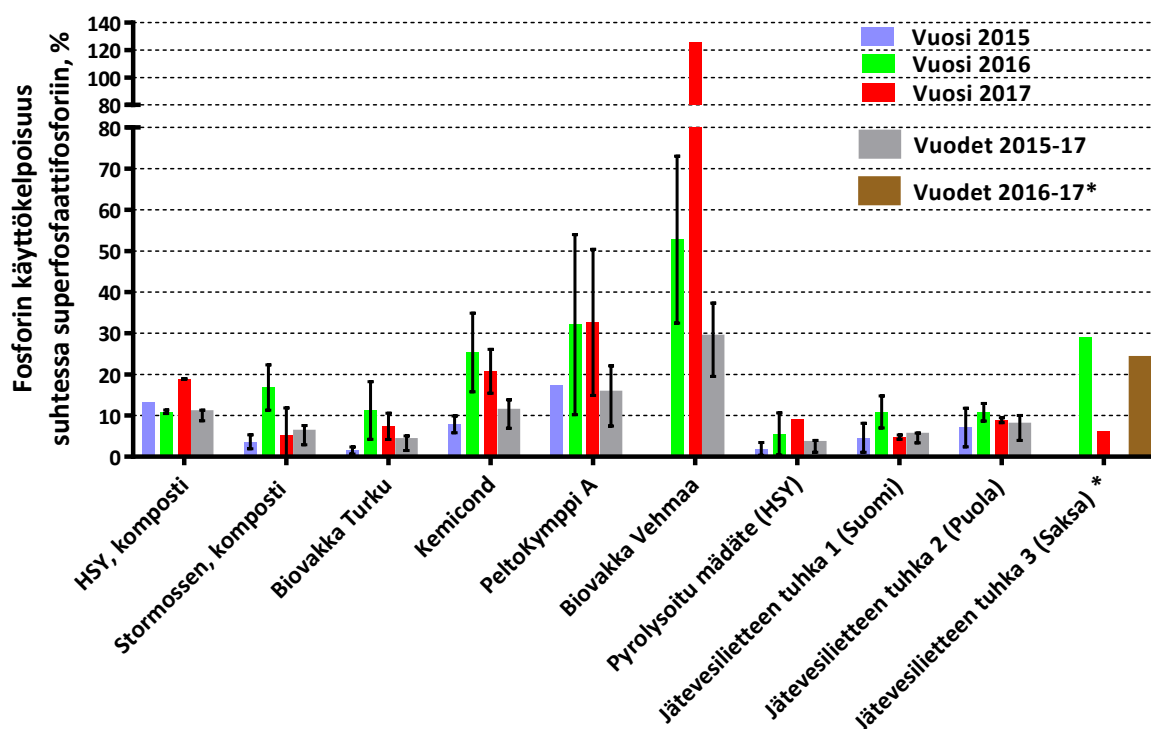
2.2.5. Fosforin käyttökelpoisuus kolmen vuoden sadoille

Jätevesilietefosforin pidempikestoinen käyttökelpoisuus ohralle kolmivuotisen kokeen aikana oli 3–10 %, eli samalla tasolla kuin välitön käyttökelpoisuus ensimmäiselle ohrasadolle (Kuva 8). On kuitenkin huomattava, että ensimmäisen koevuoden ohrasadot olivat poikkeuksellisen pienet, esimerkiksi

superfosfaattifosforilisällä 150 mg kg^{-1} vain 34 g, kun vuonna 2016 vastaavassa tilanteessa sato oli 92 g (Kuva 2). Koska ensimmäisen vuoden ohrasato tutkituilla fosforilähteillä oli kuitenkin suurin kolmivuotisen kokeen aikana (Liite 1), vaikutti se eniten sadon perusteella laskettuun fosforin käyttökelpoisuuteen vuosien 2015–2017 aikana. Toiselle ja kolmannelle sadolle lasketut fosforin käyttökelpoisuudet olivat useimmiten korkeampia ensimmäiseen koevuoteen verrattuna ja Biovakka Vehmaan kohdalla kolmantena koevuotena jopa superfosfaattifosforia parempi (Kuva 8).

Jätevesilietteen osuuden pienentyessä tutkituissa fosforilähteissä niiden sisältämän fosforin pidempikestoinen käyttökelpoisuus parani. Peltokymppi A:n käyttökelpoisuus ohralle oli 15 % ja Biovakka Vehmaan mädätteen 28 % kolmivuotisen kokeen aikana (Kuva 8). On kuitenkin huomioitava, että nämä ovat todennäköisesti aliarvioita, sillä superfosfaatin satovastekäyrää vasten tarkasteltuna jo pienempi fosforilisä (200 mg P kg^{-1}) sai aikaiseksi lähes maksimisadon Peltokymppi A:lla (93 % maksimista) ja Biovakka Vehmaan kohdalla yli maksimisadon. Varsinkin Biovakka Vehmaan mädätteen kohdalla ei fosforin käyttökelpoisuutta ohralle voitu määrittää ensimmäisenä koevuotena ja todellinen pidempikestoinen käyttökelpoisuus olisi siten ollut suurempi kuin tässä todettu, jos kasvuolosuhteet olisivat olleet otollisemmat vuonna 2015.

Lämpökemiallisesti käsiteltyjen jätevesilietteiden fosforin käyttökelpoisuus ohralle pysyi samalla alhaisella tasolla kolmivuotisen kokeen aikana ja oli korkeimmillaan 7 % Puolasta peräisin olevalle tuhkalta. Saksasta toimitetun tuhkan sisältämän fosforin käyttökelpoisuus kahden ohrasadon jälkeen oli korkeampi, 23 % (Kuva 8).

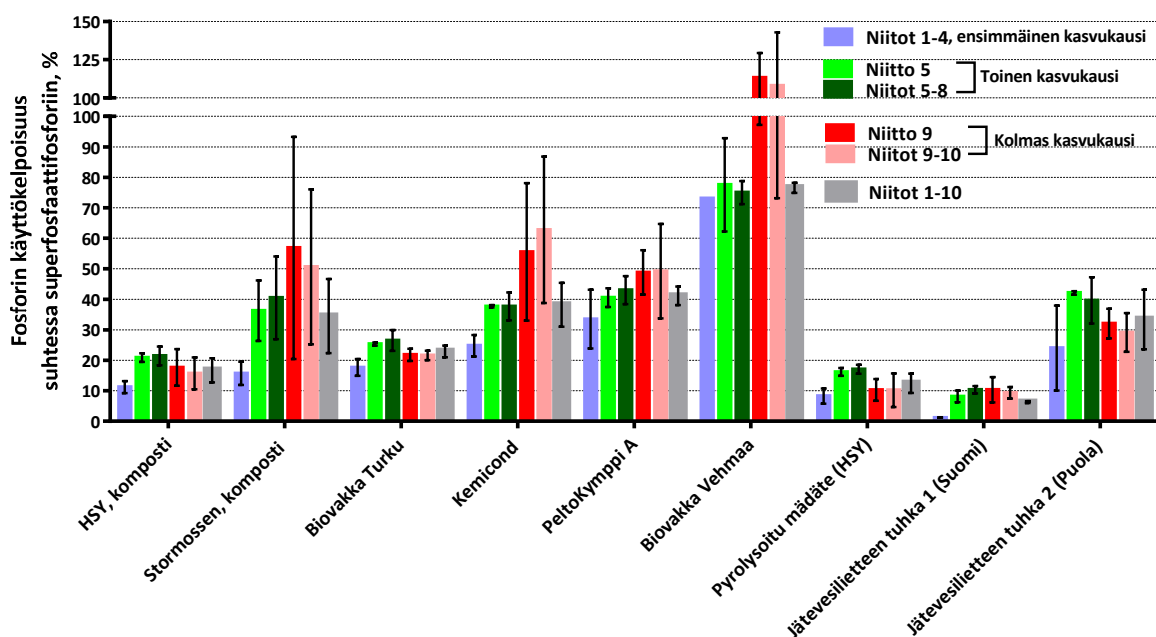


Kuva 8. Fosforin käyttökelpoisuus ohralle kolmivuotisessa kasvatuskokeessa. *Saksasta toimitetun jätevesilietteen tuhka oli mukana kasvatuskokeissa ainoastaan vuosina 2016–2017. Keskihajonnat niissä käsittelyissä, joissa molempia fosforilisäysmääriä voitiin hyödyntää laskettaessa fosforin käyttökelpoisuutta.

Raiheinällä jätevesilietefosforin käyttökelpoisuus oli 17–38 %, ja se parani kolmivuotisen kasvatuskokeen aikana (Kuva 9). Jätevesilietteen osuuden laskiessa fosforin käyttökelpoisuus parani kuten ohraakin ja oli kolmivuotisessa kokeessa parhaimmillaan 41 % (Peltokymppi A) ja 77 % (Biovakka Vehmaan mädäite) (Kuva 9). Vuoden 2015 viileä kesä ei vaikuttanut yhtä paljon raiheinän kuin ohran sa-

toon. Ainoastaan suurimmalla superfosfaattisällä raiheinäsato oli pienempi vuonna 2015 kuin vuonna 2016 (Liite 7).

Fosforin käyttökelpoisuus raiheinälle parani myös ensimmäisen kasvukauden edetessä ja oli kasvukauden neljälle niitolle laskettuna noin kaksinkertainen verrattuna välittömään eli ensimmäisen sadon perusteella arvioituun käyttökelpoisuuteen. Toisena ja kolmantena kasvukautena ei vastaavaa fosforin käyttökelpoisuuden paranemista havaittu kasvukauden edetessä (Kuva 9). Osa jätevesilietteilistä säilytti lannoitusvaikutuksensa samalla matalalla tasolla toisena ja kolmantena kasvukautena (HSY:n komposti ja Biovakka Turku), kun taas Stormossenin komposti ja Kemicond-käsitelty liete kasvattivat raiheinäsatoja hieman ensimmäisen vuoden jälkeen (Kuva 9). Varsinkin Kemicondin kohdalla parantanut käyttökelpoisuus saattaa olla seurausta orgaanisen fosforin mineralisaatiosta raiheinälle käyttökelpoiseen muotoon.

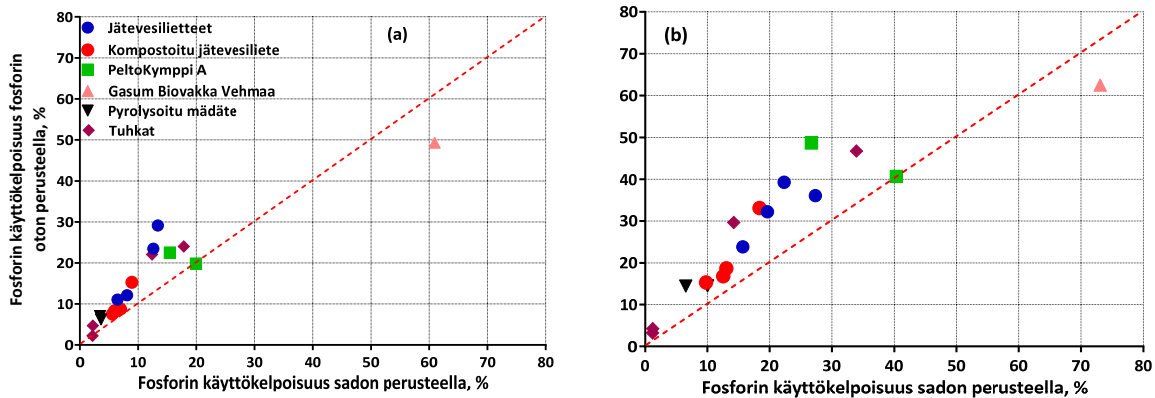


Kuva 9. Fosforin käyttökelpoisuus raiheinälle kolmivuotisessa astiakokeessa. Keskihajonnat kahden fosforilisäyksen käsittelyistä.

Pyrolysoidun jätevesilietefosforin käytökelpoisuus raiheinälle parani hieman ensimmäisen kasvukauden edetessä ja oli korkeimmillaan seuraavina koevuosina noin 20 % (Kuva 9). Jätevesilietteen tuhkan sisältämä fosfori oli käyttökelpoisuudeltaan noin 10 % kahtena viimeisena koevuotena. Puolasta toimitetun tuhkafosforin käyttökelpoisuus oli korkeampi (30–40 %), mikä johtui todennäköisesti alhaisemmasta rautapitoisuudesta.

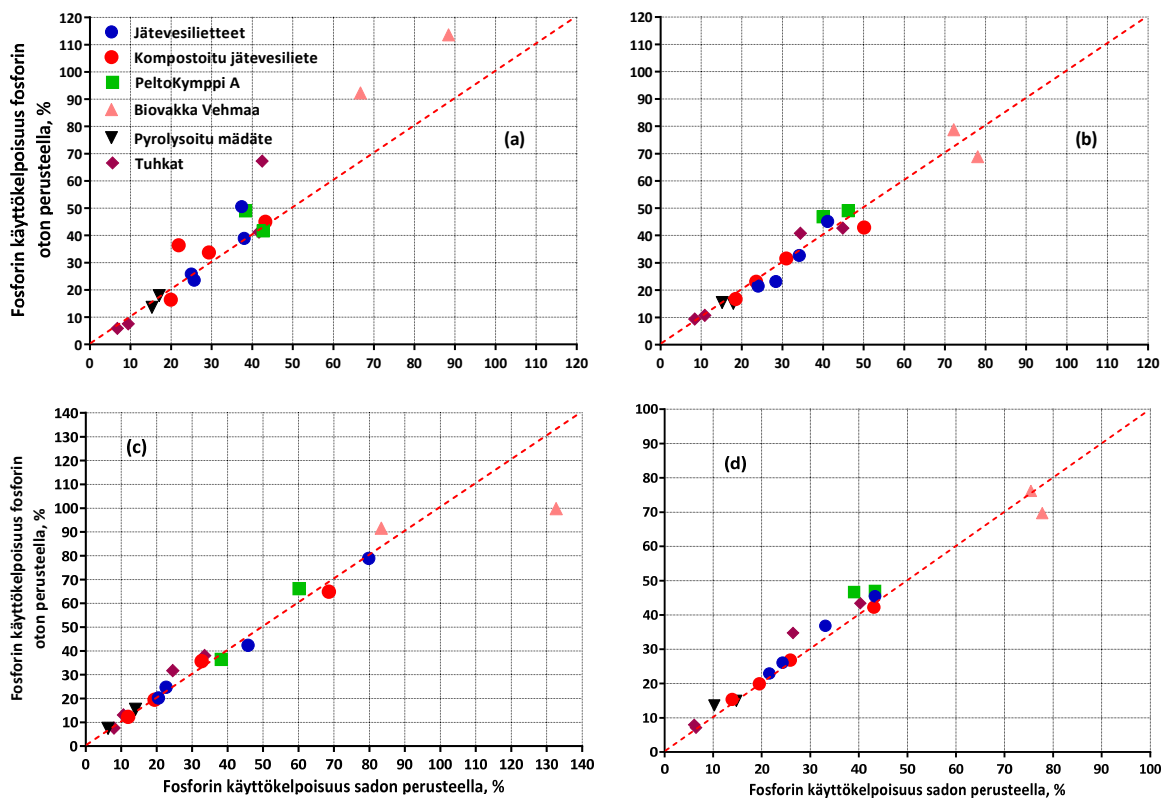
Yllä fosforilähteiden käyttökelpoisuutta on arvioitu korjatun sadon perusteella. Monissa tutkimuksissa määrittäminen tehdään sadon sijaan pelkästään fosforinoton perusteella. Tällöin fosforilannoitetun koejäsenen sadon ottamasta fosforimäärästä vähennetään fosforilannoittamattoman (kontrolli) käsitellyn ottama fosforimäärä ja suhteutetaan tulos lisättyyn fosforimäärään. On huomattava, että tällaiset kokeet ovat yleensä lyhetkestoisia ja korjattava kasvusto on vielä vegetatiivisessa kasvuvaiheessa. Tässä tutkimuksessa sato sen sijaan korjattiin myöhemmin vaiheessa, joka vastasi käytännön viljelyä. Alla esitetään vertailu sadon ja fosforinoton pohjalta laskettujen käyttökelpoisuuksien välillä.

Ensimmäisenä koevuotena fosforin oton perusteella laskettu käyttökelpoisuus yliarvioi fosforin käyttökelpoisuuden korjattuun satoon verrattuna (Kuva 10). Toisena ja kolmantena koevuotena sadon ja fosforin oton perusteella määritetyt fosforin käyttökelpoisuudet olivat samalla tasolla kuten myös



Kuva 10. Fosforin käyttökelpoisuuden vastaavuus keskenään määritettäessä käyttökelpoisuus raiheinän sadon tai sadon sisältämän fosforimäärän perusteella ensimmäiselle niitolle (a) tai ensimmäisen kasvukauden sadoille (b, neljä niittoa).

yhteensä kolmen kasvukauden aikana (Kuva 11). Tulokset viittaavat siihen, että ensimmäisenä kasvukautena tapahtui fosforin luksusottoa eli fosforinotto oli raiheinän tarpeeseen nähden liian suurta.



Kuva 11. Fosforin käyttökelpoisuuden vastaavuus sadon ja sadon ottaman fosforimäärän perusteella toisen kasvukauden ensimmäisessä niitossa (a), toisen kasvukauden neljässä niitossa (b), kolmannen kasvukauden kahdessa niitossa (c) ja kolmen kasvukauden aikana kymmenessä niitossa (d).

Fosforilannoitteita tutkittaessa fosforin käyttökelpoisuus määritetään useimmiten juuri fosforin oton perusteella (O'Connor ym. 2004; Elliott ym. 2005; Leytem & Westermann 2005; Oladeji ym. 2008; Miller & O'Connor 2009; Huang ym. 2012; Kahiluoto ym. 2015; Vogel ym. 2015). Näin menetellen säästetään kustannuksia, kun kasvustoa ei kasvateta tuleentumisasteelle tai se korjataan huomattavasti nuorempana kuin mitä peltoviljelyssä tapahtuisi. Fosforilannoitteiden käyttökelpoisuutta määri-

tettäessä olisi mielestämme kuitenkin parempi perustaa arvio todellisiin satoihin, sillä aikaisessa kasvuvaiheessa määritetty fosforipitoisuus voi antaa virheellisen tuloksen satovaikutuksesta (Ylivainio & Turtola 2009; Ylivainio ym. 2018).

2.2.6. Fosforin käyttökelpoisuuden ennustaminen uuttoliuksilla

Kun mädätettyjä ja kompostoituja jätevesilietettä uutettiin suoraan Hedleyn fraktioinnin mukaisesti, labiili fosforipitoisuus (vesi- ja 0,5 M NaHCO₃ -uuttoiset fosforijakeet) oli enimmillään 13 % fraktioiden summasta (Kuva 1). Labiili fosforipitoisuus pääsääntöisesti aliarvioi käyttökelpoisen fosforipitoisuuden ja raiheinälle enemmän kuin ohralle. Tulos osoittaa, että myös 0,1 M NaOH- ja 1 M HCl -uuttoiset jakeet ovat kasveille käyttökelpoisia, varsinkin pidemmällä ajanjaksolla, sillä fosforin käyttökelpoisuus parani ajan kuluessa.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksien (N:o 2003/2003 ja 2019/1009) mukaisista uuttoliuksista 2 % muura- ja haishapon uuttama osuus kokonaisfosforista korreloi parhaiten mädätetyn ja kompostoidun jätevesilietefosforin käyttökelpoisuuden kanssa (Taulukko 3). Muista uuttoliuksista 2 % sitruunahappo ja 1 M neutraali ammoniumsitraatti-EDTA yliarvioivat sekä välittömän että pidempikestoisen käyttökelpoisuuden. Tulos vastaa aikaisempaa tutkimusta (Ylivainio ym. 2019). Kaikki uuttoliukset yliarvioivat jätevesilietteen tuhkan käyttökelpoisuuden (Taulukko 3).

Taulukko 3. Lannoitevalmisteasetusten mukaisiin uuttoliuksiin uuttuneen fosforin osuus kokonaisfosforista sekä DGT-menetelmällä määritetty fosforin käyttökelpoisuus.

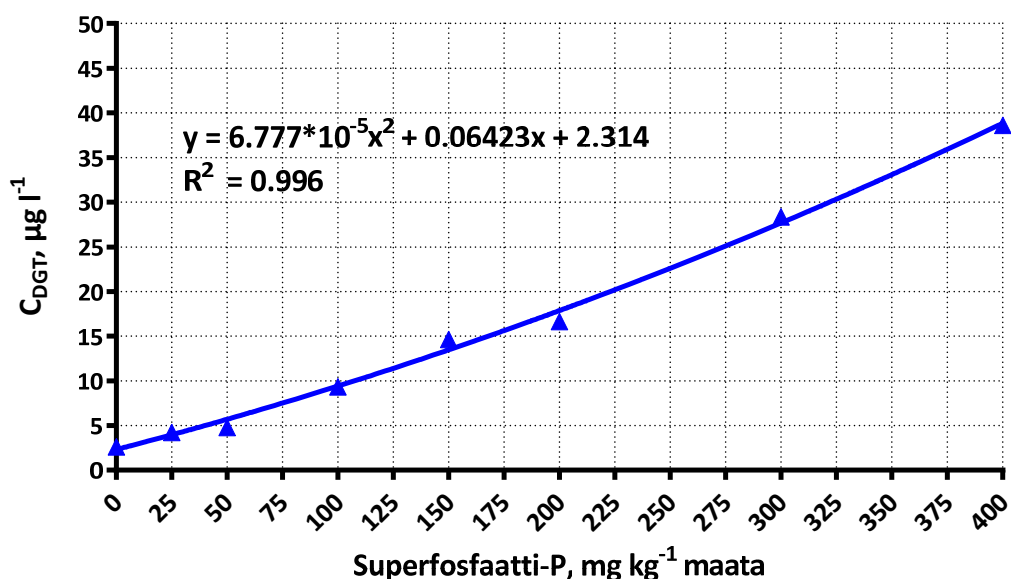
Fosforilähde	2 % muura- haishappo	2 % sitruuna- happo	1 M neutraali ammo- niumsitraatti-EDTA	DGT-menetelmä
HSY, komposti	3	32	41	10
Stormossen, komposti	10	52	70	18
Biovakka Turku	4	33	45	18
Kemicond	7	30	74	26
PeltoKymppi A	29	80	75	46
Biovakka Vehmaa	42	90	90	47
Torrefioitu mädäte (HSY)*	5	23	12	11
Tuhka 1 (Suomi)	37	50	31	12
Tuhka 2 (Puola)	88	87	65	9

*Torrefiointilämpötila (Ylivainio ym. 2019) sama kuin tämän hankkeen pyrolyysilämpötila. Molemissa tutkimuksissa jätevesiliete oli peräisin HSY:ltä.

2.2.7. Fosforin käyttökelpoisuuden ennustaminen maa-analyyseillä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin myös, sopiiko inkubointi menetelmäksi ennustaa jätevesilietepohjaisen fosforilähteen käyttökelpoisuutta. Inkubointikokeessa eri fosforilähteet saivat aikaan fosforin liukoisuuden muutoksen koemaassa, ja tätä verrattiin nousevan superfosfaattilähteen aikaansaamaan vastekäyrään (Kuva 12). Näin saatu vastaavuus superfosfaattifosforiin suhteutettiin lisättyyn jätevesilietepohjaiseen fosforimäärään käyttökelpoisuuden määrittämiseksi (Taulukko 3). DGT-menetelmä yliarvioi jätevesilietefosforin välittömän käyttökelpoisuuden sekä ohran että raiheinän (Kuva 13) ensimmäiselle sadolle. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin aikaisemmassa tutkimuksessa (Ylivainio ym. 2019).

Ohran kohdalla inkubointi yhdistettynä DGT-menetelmään yliarvioi myös kolmen vuoden aikana kasvatuskokeessa määritetyn pidempikestoisen käyttökelpoisuuden (Taulukko 3). Syynä aikaisempaa tutkimusta (Ylivainio ym. 2019) heikompaan yhteyteen kasvatuskokeen ja DGT-menetelmällä määritetyn fosforin käyttökelpoisuuden välillä on osittain seurausta ensimmäisen koevuoden heikoista ohrasadoista.



Kuva 12. Nousevan superfosfaattifosforilisän aikaansaama liukoisien fosforipitoisuuden muutos koemaassa DGT-menetelmän mukaan, kun maata oli inkuboitu kahden viikon ajan (Ylivainio ym. 2017).

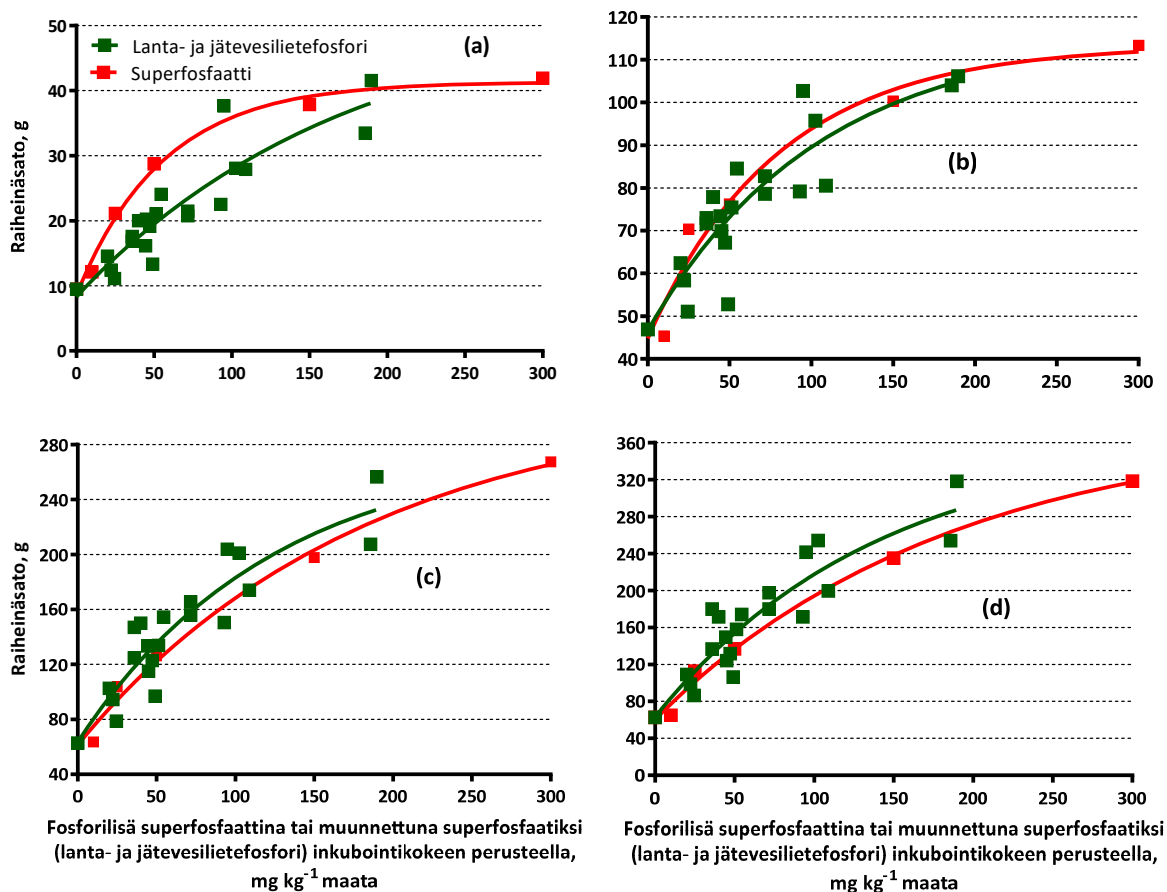
Biovakka Vehmaan osalta DGT-menetelmä ennusti hyvin ensimmäisen raiheinäsadon fosforin käyttökelpoisuuden. Vastaava havaittiin myös ohralla tutkittaessa naudan- ja sianlannan fosforia (Ylivainio ym. 2019). Toisin kuin ohran kohdalla, DGT-menetelmä antoi hyvän kuvan lietefosforin pidempikes- toisesta lannoitusvaikutuksesta raiheinälle ja menetelmä toimi hyvin kaikille tutkituille fosforilähteil- le. Myös jätevesilietteiden tuhkan osalta menetelmä ennusti fosforin käyttökelpoisuuden hyvin toi- sena ja kolmantena kasvukautena. Toisena ja kolmantena kasvukautena menetelmä hieman aliarvioi fosforilähteiden käyttökelpoisuutta, mikä saattaa johtua raiheinän kyvystä hyödyntää heikompi- liukoisia fosforijakeita fosforiköyhissä kasvuolosuhteissa, mitä taas ei voida havaita pelkästään fosfo- rin diffuusioon perustuvalla DGT-menetelmällä.

Biovakka Vehmaan osalta DGT-menetelmä ennusti hyvin ensimmäisen raiheinäsadon fosforin käyttökelpoisuuden. Vastaava havaittiin myös ohralla tutkittaessa naudan- ja sianlannan fosforia (Ylivainio ym. 2019). Toisin kuin ohran kohdalla, DGT-menetelmä antoi hyvän kuvan lietefosforin pidempikes- toisesta lannoitusvaikutuksesta raiheinälle ja menetelmä toimi hyvin kaikille tutkituille fosforilähteil- le. Myös jätevesilietteiden tuhkan osalta menetelmä ennusti fosforin käyttökelpoisuuden hyvin toi- sena ja kolmantena kasvukautena. Toisena ja kolmantena kasvukautena menetelmä hieman aliarvioi fosforilähteiden käyttökelpoisuutta, mikä saattaa johtua raiheinän kyvystä hyödyntää heikompi- liukoisia fosforijakeita fosforiköyhissä kasvuolosuhteissa, mitä taas ei voida havaita pelkästään fosfo- rin diffuusioon perustuvalla DGT-menetelmällä.

Ensimmäisen koevuoden päätteeksi (viimeisen raiheinäsadon jälkeen syksyllä 2015) koemaista otet- tujen maanäytteiden viljavuusfosforiluku (Liite 33) korreloi hyvin seuraavana vuonna korjattujen raiheinäsatojen kanssa (Kuva 14). Satovastekäyrästä laskettuun 99 % maksimisatoon vaadittava fos- foriluku aleni kasvukauden 2016 edetessä. Viljavuusfosforiluvulla 7,9 mg l⁻¹ saavutettiin 96 % toisen koevuoden yhteenlasketusta maksimisadosta. On kuitenkin huomattava, että kokeessa oli peltomit- takaavaan verrattuna huomattavasti intensiivisempi sadontuotto, mikä on havaittavissa myös koe- maan fosforiluvun nopeana alenemisena kasvukauden 2016 aikana. Esimerkiksi syksyn 2015 suurin viljavuusfosforiluku laski arvosta 8,7 arvoon 5,9 mg l⁻¹ (SF, 300 mg kg⁻¹) ohralla (Liite 31–32) ja arvosta 7,9 arvoon 4,9 mg l⁻¹ raiheinällä (Liitteet 33–34). Ensimmäisen niiton sato vuonna 2016 kuvaisi par- haiten syksyn 2015 viljavuusfosforiluvun ja sadon välistä yhteyttä, mutta optimaalista P-lukua rai-

heinälle ei voitu tuloksista määrittää (Kuva 14). Vastaava tilanne oli myös ohran kohdalla, ja johtui todennäköisesti heikosta juuristosta. Kasvukauden eteneminen ja juuriston vahvistuminen edesauttoivat raiheinää paremmin hyväksikäyttämään sekä maan omia fosforivarantoja että fosforilannoitteita.

Viimeisenä koevuonna sekä ohran että raiheinän kasvuunlähtö oli hidasta johtuen koemaan alentu-neista fosforiluvuista (Liitteet 32, 34). Lanta- ja jätevesilietepohjaisista fosforilähteistä fosforilukua ylläpiti eniten Biovakka Vehmaan mädäte (Liitteet 31–34).



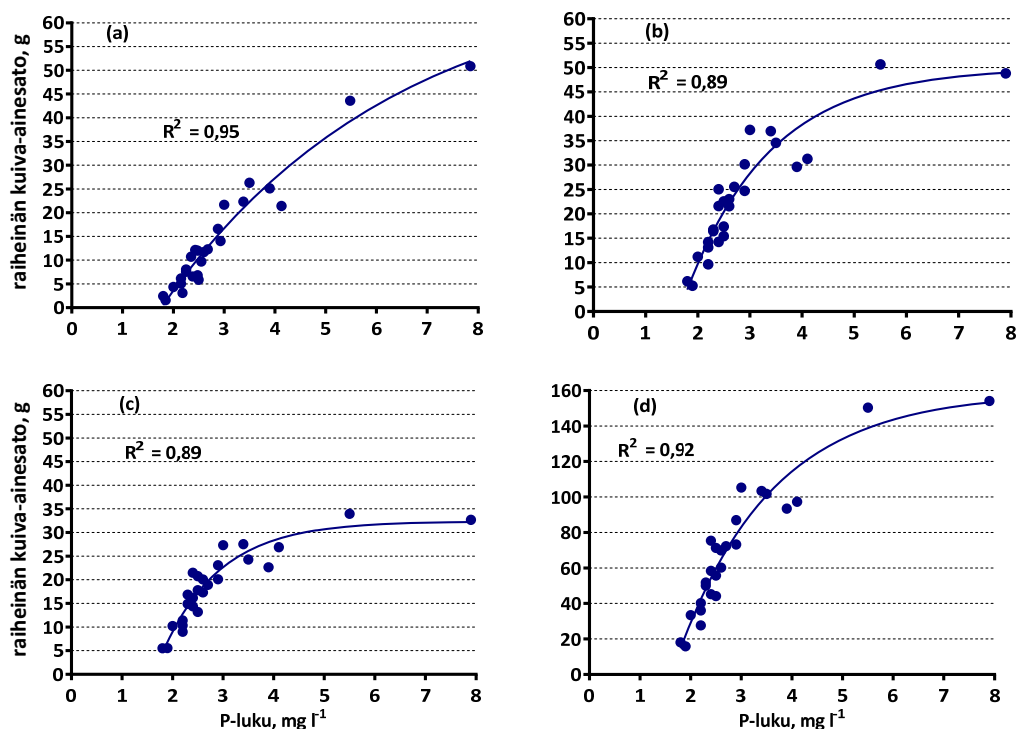
Kuva 13. Inkuboinnin jälkeen maasta DGT-menetelmällä määritetty lanta- ja jätevesilietefosforin ja väkilannoitefosforiin (superfosfaatti) vastaavuus astiakokeen raiheinäsatojen kanssa ensimmäisessä niitossa (a), ensimmäisen kasvukauden neljän niiton (b), kahden kasvukauden kahdeksan niiton (c) ja kolmen kasvukauden kymmenen niiton (d) kanssa.

2.2.8. Sadon ravinnepitoisuudet

Ohran fosforipitoisuus oli huono indikaattori fosforinpuutokselle (Liite 2). Jopa viimeisenä koevuotena kontrollikäsitellyn fosforipitoisuus oli suurempi (2,8 mg g⁻¹) kuin kriittisenä pitoisuutena pidetty 2,0–2,7 mg g⁻¹ (Hoppo ym. 1999). Tulos osoittaa, kuinka fosforin saatavuus rajoittaa sadon määrää, mutta vain heikosti hyvän fosforipitoisuutta, sillä jälkimmäinen on vahvasti geneettisesti säädelty (Wang ym. 2016). Fosforinpuutos ei vaikuttanut myöskään ohranjyvien typpipitoisuuteen. Olkien typpipitoisuus oli sen sijaan suurempi heikommin kasvaneissa käsitellyissä (Liite 2).

Fosforinpuutos kasvatti ohranjyvien ja -olkien kaliumpitoisuutta, mutta muiden makroravinteiden (Ca, Mg ja S) pitoisuuksiin sillä oli vähäisempi vaikutus (Liitteet 3–5). Mädätetyistä ja kompostoiduista lanta- ja jätevesilietepohjaisista fosforilähteistä Biovakka Vehmaan mädäte vaikutti näiden ravinteiden

den pitoisuuksiin eniten, joko nostavasti (Ca, Mg, S) tai alentavasti (K). Lämpökäsitellyistä jätevesilietepohjaisista fosforilähteistä Puolasta peräisin oleva jätevesilietteen tuhka vaikutti eniten jyvien ja olkien ravinnepitoisuuksiin, alentaen jyvien ja olkien K-pitoisuutta ja kasvattaen Mn- ja Zn-pitoisuuksia (Liitteet 3–5). Myös olkien S- ja Mo-pitoisuudet kasvoivat tuhkalisäyksen seurauksena. Kohonneisiin pitoisuuksiin ei todennäköisesti vaikuttanut ainoastaan tuhkan korkeat Mn- ja Zn-pitoisuudet, sillä Saksasta toimitetussa jätevesilietteen tuhkassa oli vastaavat pitoisuudet, mutta vaikutus ravinnepitoisuuksiin oli erilainen. Saksasta toimitettu tuhka alensi ohran Mn- ja Zn-pitoisuuksia vastaavalla tavalla kuin superfosfaatti vuonna 2016 (Liite 22). Sekä Saksasta että Puolasta toimitettu tuhka kohotti molybdeenipitoisuutta (Liite 22). Osasyynä ravinnepitoisuuksien muutokseen Puolasta peräisin olevan tuhkalisäyksen jälkeen saattoi olla koemaan korkea johtoluku (Liitteet 31–32), sillä korkea maan suolapitoisuus vaikuttaa ravinteiden ottoon ja kulkeutumiseen kasvilla (Grattan & Grieve 1999). Sen sijaan Saksasta toimitettu tuhka kasvatti koemaan johtolukua huomattavasti vähemmän (Liite 35) ja korkeampi tuhkan Mo-pitoisuus (Taulukko 1) saattoi olla syynä kohonneisiin Mo-pitoisuuksiin ohrassa (Liite 22). Toisena koevuotena Saksasta toimitetulla jätevesilietteen tuhalla ei ollut enää vaikutusta ohran ravinnepitoisuuksiin (Liite 23).



Kuva 14. Astiakoemaiden viljavuusfosforiluku vuoden 2015 kasvukauden jälkeen ja vuoden 2016 ensimmäisen (a), toisen (b), kolmannen (c) sekä yhteenlaskettu neljän niiton raiheinäsato (d). Huomioi eri skaala y-akselilla kuvassa d.

Myös raiheinän fosforipitoisuus oli huono indikaattori fosforinpuutokselle ensimmäisissä niitoissa kahtena ensimmäisenä koevuotena. Vaikka fosforipitoisuus oli ensimmäisessä niitossa suurempi raiheinän kontrollikäsitelyssä ($2,0 \text{ g kg}^{-1}$) verrattuna superfosfaattifosforilisään ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$) (Liite 8), oli raiheinäsato yli kaksinkertainen superfosfaattikäsitelyssä (Liite 7). Vastaava oli havaittavissa vuonna 2016 perustetussa superfosfaattiverranteessa (Liitteet 25–26). Fosforipitoisuus oli kontrollissa $1,5 \text{ g kg}^{-1}$, kun se superfosfaattifosforilisällä 150 mg kg^{-1} oli $1,0 \text{ g kg}^{-1}$, mutta vastaavat raiheinäsadot olivat 5,3 ja 63,4 g.

Sen sijaan toisesta niitosta eteenpäin raiheinän fosforipitoisuudet olivat kontrollikäsitelyssä alhaisimmalla tasolla käsittelyjen kesken (Liitteet 9–18, 26). Raiheinän fosforipitoisuudet noudattivat lan-

ta- ja jätevesilietefosforin liukoisuutta (Kuva 1); helppoliukoisimmat fosforilähteet, kuten Biovakka Vehmaa, Peltokymppi A ja Kemicond, nostivat raiheinän fosforipitoisuutta eniten (Liitteet 8–18). Puolasta peräisin ollut jätevesilietteen tuhka kasvatti raiheinän fosforipitoisuutta enemmän kuin Suomen vastaava huolimatta lähes samanveroisesta fosforin liukoisuudesta (Kuva 1). Tulos osoittaa, että fosforin liukoisuus ei aina ole hyvä indikaattori biosaatavuudelle. Viimeisen koevuoden ensimmäisessä niitossa raiheinän fosforipitoisuus oli kontrollikäsittelyssä ainoastaan $0,7 \text{ g kg}^{-1}$, kun raiheinällä alle 1 g kg^{-1} pitoisuuden on katsottu olevan merkinä voimakkaasta fosforin puutoksesta (Yli-Halla 1991). Toisessa niitossa kontrollikäsittelyn fosforipitoisuus oli $1,9 \text{ g kg}^{-1}$, mutta raiheinäsadot olivat alhaisia (Liite 7), mikä viittaa fosforin konsentroitumiseen heikosta kasvusta johtuen.

Samoin kuin ohrankin kohdalla raiheinän K-pitoisuus aleni fosforin saatavuuden parantuessa, mutta erot pienenevät kasvukausien ja koevuosien edetessä (Liitteet 8–18). Muiden makroravinteiden (Ca, Mg, S) osalta pitoisuudet superfosfaatti- ja lanta- ja jätevesilietefosforia saaneissa käsittelyissä olivat samaa tasoa, varsinkin helppoliukoisempia fosforilähteitä käytettäessä (Liitteet 8–18). Poikkeus oli Puolasta toimitettu jätevesilietteen tuhka. Varsinkin raiheinän Ca-pitoisuus oli alhaisin muihin käsittelyihin verrattuna. Syynä voi olla käsittelyn korkea johtoluku (Liitteet 33–34), sillä korkea maan suolapitoisuus heikentää kalsiumin saatavuutta sekä kulkeutumista kasvilla (Grattan ja Grieve 1999). Lanta- ja jätevesilietepohjaisilla fosforilähteillä oli samansuuntainen vaikutus raiheinän mikroravintepitoisuuksiin kuin superfosfaatilla. Mikroravinteidenkin kohdalla Puolasta toimitettu jätevesilietteen tuhka kasvatti eniten raiheinän Mn-, Zn- ja Mo-pitoisuuksia, todennäköisesti korkeasta suolapitoisuudesta johtuen (Grattan ja Grieves 1999).

2.2.9. Haitallisten raskasmetallien pitoisuudet

Haitallisten raskasmetallien (Cd, Pb, Ni, As, Cr, Co) pitoisuudet ohran jyvissä ja oljissa analysoitiin kahden ensimmäisen koevuoden sadoista (Liite 6). Jyvä- ja olkisatojen Cd-pitoisuudet lanta- ja jätevesilietelisyksen jälkeen olivat samalla alhaisella tasolla kuin fosforilannoittamattomassa (kontrolli) käsittelyssä. Tulos on samansuuntainen kuin aikaisemmassakin tutkimuksessa (Ylivainio ym. 2019). Ainoastaan Peltokymppi A kasvatti jyvien Cd-pitoisuutta tilastollisesti merkitsevästi molempina koevuosina ja kaksi suurinta superfosfaattifosforilisää ensimmäisenä koevuonna (Liite 6), huolimatta siitä, että superfosfaatin mukana lisättiin vähiten kadmiumia koemaahan kokeen perustamisen yhteydessä.

Jyväsatujen Pb-, Co- ja As-pitoisuudet olivat alle määritysrajojen molempina koevuosina ja Cr-pitoisuudet olivat fosforilisyksen seurauksena pienempiä kuin kontrollissa toisena koevuonna. Olkisatojen Cd- ja Pb-pitoisuuksia nosti tilastollisesti merkitsevästi ainoastaan Puolasta toimitettu jätevesilietteen tuhka toisena vuonna ja superfosfaatti Ni- ja As-pitoisuutta ensimmäisenä vuonna. Saksasta toimitettu jätevesilietteen tuhka alensi ohran Cd- ja Pb-pitoisuuksia, jopa alemmalle tasolle kuin superfosfaatti (Liite 24). Raiheinän haitalliset raskasmetallipitoisuudet olivat samalla tasolla kuin superfosfaattikäsittelyssä ja pitoisuudet olivat samalla tasolla kontrollikäsittelyn kanssa (Liitteet 19–20).

3. Haitta-aineet jätevesilietteissä ja biosaatavuus

3.1. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksessa selvitettiin orgaanisten haitta-aineiden ja raskasmetallien esiintymistä sekä orgaanisten haitta-aineiden kertymistä kasveihin erilaisista lietepohjaisista maanparannusaineista ja lannoitevalmisteista. Määdätetystä jätevesilietteestä, kompostoidusta jätevesilietteestä (Metsäpirtin maanparannuskomposti), pyrolysoidusta mädätteestä (HSY) ja Kemicond-lietteestä analysoitiin PAH-, PFAA-, PBDE- lääkeaine-, biosidi- ja raskasmetallipitoisuudet. Lisäksi kyseisiä materiaaleja käytettiin biotes-teissä ja muita paitsi mädätettyä jätevesilietettä kasvatuskokeissa.

Näiden lisäksi toteutettiin laaja kartoituss PBDE-yhdisteiden esiintymisestä jätevedenpuhdistamoilta peräisin olevissa lietepohjaisissa lannoitevalmisteissa (mädäte, kemiallisesti käsitelty ja kompostoitu mädäte sekä kompostista edelleen valmistettu multa). Työssä valittiin tarkasteltavaksi ainoastaan sellaisia lannoitevalmisteita, joiden raaka-aineena oli käytetty yksinomaan jätevedenpuhdistamon lietettä. Laitokset sijaitsivat eri puolilla Suomea (Kuva 15), ja osa niistä vastaanotti jätevesiä mm. kemianteollisuudesta, puu-, metalli-, elintarvike- ja räjähdysaineteollisuudesta, konepajoilta ja korjaamoilta sekä kaatopaikoilta. Osa yhdyskuntalietteen jatkokäsittelijöistä puolestaan vastaanotti vain yhden jätevedenpuhdistamon lietettä, kun taas osa useamman, jopa 12 puhdistamon lietettä. Tarkastellut valmisteet ja näytteenottoajankohdat on esitetty taulukossa 4.



Kuva 15. Työhön sisältyneiden käsittelylaitosten sijainti.

Taulukko 4. Lietevalmisteet, joista määritettiin valitut haitta-aineet.

Lietevalmiste	Tarkemmat tiedot	Näytteenotto
HSY Komposti	Noin 6 kk kompostoitu mädäte (maanparannuskomposti)	24.5.2016
Oulu Kemicond	Oulun kemiallisesti käsitelty mädäte	26.5.2016
HSY Mädäte	HSYn mädätetty liete	18.4.2016
HSY Pyrolysoitu mädäte	HSYn pyrolysoitu mädäte	24.5.2016
Joensuun vesi, komposti	Mädätetty liete + komposti + hiekka. Näytteet valmiista maanparannuskompostista.	24.2.2017
Somero, komposti	Suotonauhakuivattu liete + turve. 2 vk lämpökäsittelyn jälkeä aumakompostointiin. Näyte otettu aumasta.	6.3.2017
Orivesi, komposti	Ruuvikuivattu liete + turve. Kompostoitu 1 vk rumpukompostissa ja vähintään 6 kk aumalla.	7.3.2017
Tampere, Vehkosuon komposti	Viinikanlahden ja Raholan jätevedenpuhdistamoiden lietettä kompostoitu oljen kanssa.	7.3.2017
Hämeenlinna, HS Vesi, komposti	Mädätetty liete kompostoitu aumoissa. Näytteet otettu kypsästä kompostista.	7.3.2017
Levin Vesihuolto Oy, komposti	Puhdistamolietettä ja sakokaivolietettä kompostoitu hakkeen ja turpeen kanssa. Näyte otettu mahdollisimman kypsästä kompostiaumasta.	8.3.2017
Taivalkoski, komposti	Ruuvikuivattu liete + puunkuori + puru. Kompostoitu n. 6 kk.	8.3.2017
Kokkola, komposti	Mädätysjäännös + puunkuori + turve. Näytteet otettu kompostiaumasta.	7.3.2017
Kekkilä Oy, Teuva, komposti	Jätevesiliete + turve. Näytteet kompostiaumasta.	13.3.2017
Gasum Oy, Turku, mädäte	Käsiteltävä jätevesiliete lähtöisin monilta jätevedenpuhdistamoilta. Mädätys + terminen hydrolysointi + linkokuivaus. Näytteet otettu varastohalliin vievältä hihnalta.	6.3.2017
Kemira Operon Oy, Oulu, kemiallisesti käsitelty liete	Kemicond-käsitelty jätevesiliete. Näytteet otettu varastosii- loon ohjattavasta materiaalista.	28.2.2017
Suomen ekolannoite Oy, Vihti, kemiallisesti käsitelty liete	Kemiallisesti käsitelty linkokuivattu jätevesiliete. Näytteet otettu varastokentältä.	6.3.2017
Wiitaseudun Energia Oy, Viitasaari, multa	Jätevesiliete + puunkuori + hiekka + puru. Näytteet otettu kypsästä kompostiaumasta.	9.3.2017
Napapiirin Energia ja Vesi Oy, multa	Puhdistamolietettä ja sakokaivolietettä kompostoitu seosain- eiden kanssa. Näytteet otettu edelliseltä vuodelta ylijää- neestä materiaalista, joka sisälsi tunneli- ja aumakompostoi- tua materiaalia.	9.3.2017
Mustankorkea Oy, Jyväskylä, Inframulta	Näytteet otettu valmiista tuotteesta. Kompostia kypsytetty 12 kk.	21.3.2017
Mustankorkea Oy, Jyväskylä, Ympäristömulta	Näytteet otettu valmiista tuotteesta. Kompostia kypsytetty 12 kk.	21.3.2017

Vuoden 2016 näytteet kompostoidusta ja kemiallisesti käsitellystä mädätteestä toimitettiin tuoreena Luken ja SYKEN laboratorioihin. SYKEN laboratoriossa näytteet pakastettiin haitta-aineanalyysia ja biotestejä varten. Luken laboratoriossa näytteet säilytettiin +5 °C:ssa raskasmetallien määrittämiseen sekä kasvatuskokeiden perustamiseen saakka. Kasvatuskokeet perustettiin kaksi päivää näytteiden otosta. Ilmakuivattu (kuiva-ainepitoisuus noin 92 %) jätevesiliete (HSY) pyrolysoitiin kuten on kuvattu edellä (Luku 2.1.1.). Pyrolysoituun kuiva-ainejakeeseen päätyi 77,5 % ilmakeivän näytteen massasta. Neste- ja kaasujakeen osuudet olivat vastaavasti 18,0 ja 4,5 %.

Vuonna 2017 kerätyistä näytteistä analysoitiin PBDE-yhdisteet sekä alkuaineista P-, N-, C- ja Cd-pitoisuudet. Näytteet otettiin Vihdin, Someron, Turun, Oriveden, Tampereen ja Hämeenlinnan näyt-

teiden osalta SYKEN näytteenottajan toimesta. Muilla kohteilla näytteenoton toteutti laitoshenkilökunta SYKEN ohjeistuksen mukaisesti. Näytteet kerättiin vähintään 15 osanäytteen kokoomina käyttäen puhtaita muovisia välineitä ja väliastian valkoista muoviämpäriä. Osanäytteiden tilavuudet pyrittiin pitämään vakiona. Kompostiaumoista tai varastokasoista otetut näytteet kerättiin kasojen eri puolilta ja eri syvyyksiltä. Väliastian kerätyistä kokoomanäytteistä koostettiin 300–400 gramman näytteet kahteen pussiin: PBDE-määrityksiä varten Rilsan-näytepussiin ja alkuainemäärityksiä varten 1 litran Minigrip-pussiin. Tarkasteltavien aineiden pysyvyyden takia näytteitä ei katsottu tarpeelliseksi varastoida ja kuljettaa kylmässä, vaan näytteet pakattiin pahvilaatikoihin ja toimitettiin SYKEN (PBDE-analyysit) ja Luken (alkuaineanalyysit) laboratorioihin ja pakastettiin (SYKE) tai säilytettiin +5 °C:ssa (Luke) analyysijä varten.

Haitta-aineanalyysieihin ja riskinarviointiin valittiin aineryhmiä, joiden tiedetään aiempien tulosten perusteella esiintyvän lietteissä ja lietevalmisteissa sekä maaperässä lietelevityksen jälkeen (Kasurinen ym. 2014, Fjäder 2016).

3.1.1. Lääkeaineet ja biosidit

Lääkeaineet sekä biosidit triklosaani ja triklokarbaani valittiin aiempien tutkimusten perusteella (Kasurinen ym. 2014, Fjäder 2016). Lisäksi valinnassa hyödynnettiin yhdisteiden käyttömäärätietoja sekä tarkasteltiin, mille aineille on saatavilla analytiikkaa. Jätevesilietteisiin on havaittu pidättävän lukuisia eri lääkeaineita, kuten tulehduskipulääkkeitä, hormonaalisia yhdisteitä, keskushermostoon vaikuttavia yhdisteitä, epilepsia- ja psyykelääkkeitä, antibiootteja sekä sydän- ja verisuonitautien hoitoon käytettäviä lääkkeitä. Lääkeaineiden pidättymistä lietteeseen säätelee mm. niiden hydrofobisuus (Vieno 2007). Koska kuivatun lietteen vesipitoisuus on noin 80 % (Vieno ym. 2018), myös käyttömäärältään suuret, vesiliukoiset lääkeaineet, kuten parasetamoli ja ibuprofeeni, voivat päätyä lietteeseen.

3.1.2. Polybromatut difenyylieetterit (PBDE)

Polybromattuja difenyylieettereitä (PBDE) on käytetty laajasti palonsuoja-aineina mm. elektroniikkateollisuudessa, erilaisissa muoveissa ja tekstiileissä. PBDE-yhdisteisiin kuuluu laaja joukko yhdisteitä, jotka eroavat toisistaan bromiatomien lukumäärän ja sijainnin perusteella. PBDE-yhdisteiden on todettu olevan ympäristössä erittäin pysyviä ja korkeamman bromausasteen PBDE-yhdisteiden hajoamistuotteina voi syntyä alemman bromausasteen yhdisteitä (UNEP 2014). Bromatuista difenyylieettereistä kaupalliset pentaBDE- ja oktaBDE-seokset on lisätty Tukholman sopimukseen jo vuonna 2009 (POP-asetus (EU) 2019/1021). BDE-209 lisättiin puolestaan Tukholman sopimukseen vuonna 2017, tietyin erityisin poikkeuksin ja sallituin käyttöön ((EU) 2019/1021). Koska PBDE-yhdisteitä sisältäviä tuotteita on edelleen käytössä, niitä päätyy yhä jätevesilietteeseen (Kasurinen ym. 2014, Fjäder 2016). Jätevesilietteen levityksen kautta maaperään päätyvä PBDE-kuorma on arvioitu selvästi suuremmaksi kuin ilmalaskeuman kautta tuleva kuormitus (Kasurinen ym. 2014, Marttinen ym. 2014, Suominen ym. 2014). PBDE-yhdisteiden on havaittu myös jossain määrin kertyvän maaperästä kasveihin ja maaperäeliöihin kuten lieroihin (Vrkoslavová ym. 2010, Huang ym. 2011, Fjäder 2016).

3.1.3. Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)

PAH-yhdisteitä muodostuu mm. erilaisissa palamisprosesseissa, erityisesti epätäydellisessä palamisessa. Tästä syystä hankkeessa haluttiin selvittää, syntykö niitä pyrolyysiprosessissa. PAH-yhdisteiden on todettu olevan karsinogeenisia ja aiheuttavan sekä DNA- että sikiövaurioita. PAH-yhdisteet hajoavat jonkin verran jäteveden puhdistusprosessissa, mutta varsinkin suurimolekyyliset yhdisteet ovat varsin pysyviä. Monet näistä yhdisteistä ovat hydrofobisia ja pidättyvät siten kiintoaineeseen, minkä vuoksi ne päätyvät lietteeseen. PAH-yhdisteet voivat kertyä viljelymaahan, jos niitä

sisältäviä lannoitevalmisteita käytetään toistuvasti (Wild ym. 1990). PAH-yhdisteet kertyvät vain niukasti maaperästä kasveihin (Khan ja Cao 2012) ja tärkein reitti kasveihin on ilmalaskeuma (Phillips 1999). PAH-yhdisteiden kertyvyyttä kasveihin ei selvitetty tässä hankkeessa. Myös PAH-yhdisteiden kertyminen rehusta eläinperäisiin elintarvikkeisiin on vähäistä (Fries 1996). Biokaasulaitosten mädätysjäännösten tai puhdistamolietteen sisältämät PAH-yhdisteet on todettu vain vähäiseksi riskiksi elintarvikkeiden turvallisuudelle Suomessa (Suominen ym. 2014) ja Norjassa (Eriksen ym. 2009). Tanskassa (Σ PAH11) ja Ruotsissa (Σ PAH6) raja-arvo lietteiden PAH-yhdisteille kuiva-aineessa on 3 mg kg⁻¹ (Marttinen ym. 2014).

3.1.4. Perfluorialkyyliyhdisteet

Per- ja polyfluorialkyyliyhdisteet (PFAS) ovat synteettisiä orgaanisia yhdisteitä, joissa vähintään yhden hiiliatomin kaikki vetyatomit on korvattu fluoriatomeilla. Perfluorialkyylihapot (PFAA) ovat PFAS-yhdisteiden alaryhmä, johon lukeutuu mm. karboksyyli- ja sulfonihappoja, joissa kaikki hiileen sitoutuneet vedyt on korvattu fluorilla. Hiiliatomeihin sitoutuneiden vetyatomien korvaaminen fluoriatomeilla tekee PFAA-yhdisteistä käytännössä hajoamattomia ympäristössä. PFAA-yhdisteitä on käytetty teollisuudessa sekä kuluttajatuotteissa niiden vettä, likaa ja rasvaa hylkivien ominaisuuksien vuoksi. Aineryhmän tunnetuimmat ja eniten käytetyt yhdisteet perfluorioktaanisulfonaatti (PFOS) ja perfluorioktaanihappo (PFOA) kuuluvat Tukholman yleissopimuksen mukaisiin ja EU:n POP-asetuksella (EU 2019/1021) säädeltyihin pysyviin orgaanisiin yhdisteisiin. Pitkäketjuiset perfluorikarboksyylihapot (C8-14) sekä PFHxS ovat myös REACH:n erityistä huolta aiheuttavien yhdisteiden listalla (<https://echa.europa.eu/candidate-list-table>).

PFAS-ryhmään lukeutuu myös yhdisteitä, jotka voivat hajota PFAA-yhdisteiksi. PFAA-yhdisteet eivät hajoa biologiskemiallisessa jätevedenpuhdistusprosessissa, vaan usein niiden pitoisuudet jopa kasvavat johdannaisten hajotessa PFAA-yhdisteiksi (mm. Guerra ym. 2014). Erityisesti pitkäketjuiset PFAA-yhdisteet ($\geq$ C6 sulfonihapot ja $\geq$ C7 karboksyylihapot) pidättyvät jätevesilietteeseen. Lietteen käsittely esimerkiksi kompostoimalla ei hajota PFAA-yhdisteitä (Sáez ym. 2008, Fjäder 2016). PFAA-johdannaisten on havaittu olevan vallitseva PFAS-yhdisteiden ryhmä jätevesilietteissä. Perfluorikarboksyylihapoiksi (mm. PFOA) hajovien yhdisteiden osuus lietteistä määritetyistä PFAS-yhdisteistä oli 75 % ja perfluorisulfonihapoiksi (mm. PFOS) hajoavien yhdisteiden 14 % (Kärrman ym. 2018), mikä selittää PFAA pitoisuuksien kasvun kompostoinnin aikana. Koska kompostointi ei hajota kaikkia johdannaista, niitä esiintyy myös lopputuotteissa (Lazcano ym. 2019). Vain mitattujen PFAA-yhdisteiden perusteella tehty maaperän kuormitusarviot voivat siksi olla todellista pienempiä, koska johdannaisten hajoaminen PFAA-yhdisteiksi jatkuu maaperässä (mm. Liu & Avendaño 2013).

PFAA-yhdisteet voivat aiheuttaa terveysriskejä esimerkiksi kulkeutuessaan juomaveteen sekä haitallisia vaikutuksia maa- ja vesiekosysteemeissä. Erityisesti vesistöissä PFAA-yhdisteitä todetaan yleisesti lähes kaikkialla ja pitkäketjuisten (esim. PFOS, PFOA) on todettu kertyvän herkästi eliöihin, kuten kaloihin. PFAA-yhdisteiden kertyvyyttä kasveihin ei tutkittu tässä hankkeessa, koska niiden kertyvyyttä on tutkittu aiemmin BIOSAFE-hankkeessa (Marttinen ym. 2014). BIOSAFE-hankkeen ja kirjallisuuden perusteella niiden tiedetään kertyvän kasveihin esimerkiksi lietepohjaisilla tuotteilla lannoitettua maasta (mm. Ghisi ym. 2019, Suominen ym. 2014). EFSA:n alustavan arvion mukaan merkittävä osa EU:n kansalaisista altistuu ravinnon kautta turvallisiksi arvioitua suuremmalle määrälle PFOS:a (13 ng kg⁻¹) ja PFOA:a (6 ng kg⁻¹) kehon painoa kohden viikossa (EFSA 2018).

3.1.5. Kemialliset määritykset

Lietevalmisteista analysoitiin kaikkiaan 63 orgaanista yhdistettä (Taulukko 5). Lääkeaineet ja biosidit uutettiin pakastetuista lietevalmiste- ja maanäytteistä, jauhetuista kauranjyvistä sekä pakastetusta ja hienonnetusta raiheinästä metanolilla tai asetonitrilillä ja puskuriliuoksen seoksella. Uutteet puhdis-

tettiin kiinteäfaasiuutolla (Chromabond Na₂SO₄/Florisil, 6 ml, 2000/2000 mg, Oasis MAX 6 cc, 150 mg tai Oasis HLB 6 cc, 200 mg). PFAA-yhdisteet uutettiin kylmäkuivatuista lietevalmistenäytteistä metanolilla. PAH-yhdisteet uutettiin kylmäkuivatuista lietevalmistenäytteistä asetoni-heksaaniseoksella ja uutteen puhdistettiin kiinteäfaasiuutolla (Biotage ISOLUTE EPH-M). PBDE-yhdisteet uutettiin kylmäkuivatuista lietevalmistenäytteistä paineistetulla nesteuutolla dikloorimetaaniin. Uutteet puhdistettiin monikerrossilikapylväällä sekä emäksisellä aluminalla. Kaurajauhasta PBDE-yhdisteet uutettiin etyyliasetaattiin QuEChERS-menetelmällä ja uute puhdistettiin kiinteäfaasiuutolla (monikerrossilika ja alumina). Lääkeaineet, biosidit ja PFAA-yhdisteet analysoitiin nestekromatografi-tandemmassaspektrometrilla (UPLC-MS/MS). PAH- ja PBDE-yhdisteet analysoitiin kaasukromatografi-tandemmassaspektrometrilla (GC-MS/MS). Orgaanisten yhdisteiden pitoisuudet ilmoitetaan kuiva-ainetta kohden.

Taulukko 5. Analysoidut orgaaniset haitta-aineet.

Yhdiste	Lyhenne	Yhdiste	Lyhenne
PFAA	Perfluoributaanihappo	PAH	Bentso(a)antraseeni
	Perfluoripentaanihappo		Bentso(a)pyreeni
	Perfluoriheksaanihappo		Bentso(b)fluoranteeni
	Perfluoriheptaanihappo		Bentso(e)pyreeni
	Perfluorioktaanihappo		Bentso(ghi)peryleeni
	Perfluorinonaanihappo		Bentso(k)fluoranteeni
	Perfluoridekaanihappo		Dibentso(a,h)antraseeni
	Perfluoriundekaanihappo		Fenantreeni
	Perfluoridodekaanihappo		Fluoranteeni
	Perfluoritridekaanihappo		Fluoreeni
	Perfluoritetradekaanihappo		Indeno(1,2,3-cd)pyreeni
	Perfluoriheksadekaanihappo		Kryseeni
	Perfluorioktadekaanihappo		Naftaleeni
	Perfluoributaanisulfonihappo		Peryleeni
	Perfluoriheksaanisulfonihappo		Trifenyleeni
	Perfluoriheptaanisulfonihappo		17β-estradioli
	Perfluorioktaanisulfonihappo		Atenololi
	Perfluoridekaanisulfonihappo		Diklofenaakki
			Ibuprofeeni
PBDE	2,4,4'-Tribromidifenyyleetteri	Lääkeaineet ja biosidit	Karbamatsepiini
	2,2',4,4'-Tetrabromidifenyyleetteri		Metoprololi
	2,3',4,4'-Tetrabromidifenyyleetteri		Norfloksasiini
	2,2',3,4,4'-Pentabromidifenyyleetteri		Ofloksasiini
	2,2',4,4',5-Pentabromidifenyyleetteri		Parasetamoli
	2,2',4,4',6-Pentabromidifenyyleetteri		Siprofloksasiini
	2,2',4,4',5,5'-Heksabromidifenyyleetteri		Sotaloli
	2,2',4,4',5,6'-Heksabromidifenyyleetteri		Sulfadiatsiini
	2,2',3,4,4',5,6'-Heptabromidifenyyleetteri		Tetrasykliini
	2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-Dekabromidifenyyleetteri		Triklorkarbaani
PAH	1-Metyyli-naftaleeni		Triklorsaani
	2-Metyyli-naftaleeni		
	Antraseeni		
	Asenaftteeni		
	Asenaftyleeni		

Maanparannusaineiden alkuainekoostumus määritettiin ilmakeivista näytteistä kuningasvesihajotuksen jälkeen ja hiili- ja typpipitoisuus LECO:lla kuten edellä (Luku 2.1.2.). Lietevalmisteistä määritettiin lannoitevalmisteasetuksen (MMM 24/11) mukaiset raskasmetallit.

3.1.6. Haitta-aineiden kertyminen kasveihin

Kasvatuskokeilla tutkittiin maanparannusaineiden sisältämien orgaanisten haitta-aineiden (PBDE, lääkeaineet, biosidit) kertymistä raiheinään (lajike Barmultra II) ja kauranjyviin (lajike Riikka). Koska PBDE-yhdisteiden oletettiin kerääntyvän erityisesti kasvien rasvajakeisiin, niitä tutkittiin vain kaurasta ja kauralajikkeeksi valittiin mahdollisimman suuren rasvapitoisuuden omaava lajike.

Kasvatuskokeet perustettiin kaksi päivää lietevalmisteen näytteenotosta. Kasvatusalustana käytettiin samaa fosforiköyhää hietamaata kuin fosforin käyttökelpoisuustutkimuksissa. Ennen puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden ja epäorgaanisten lannoitteiden lisäystä koemaasta (5,5 kg) seulottiin 4 mm seulalla siementen peittämiseen tarvittava maamäärä (0,5 l kauralle ja 0,3 l raiheinälle), minkä jälkeen koemaahan lisättiin kaksi lisäystasoa kompostoitua ja mädätettyä lietettä: 63,5 ja 634,6 g. Määrät vastaavat laskennallisesti 30 ja 300 tn ha⁻¹ levitysmääriä (0,2 m muokkauskerros, maan tilavuuspaino 1 300 kg m⁻³). Pyrolysoitua mädätettä lisättiin 63,5 ja 253,9 g koeastiaa kohden, mikä vastasi laskennallisesti 30 ja 120 tn ha⁻¹. Kaikkiin koeastioihin lisättiin ravinnepuutosten ehkäisemiseksi ravinteita epäorgaanisina yhdisteinä samaan tapaan kuin edellä (Luku 2.1.3). Tämän lisäksi astioihin lisättiin fosforia rakeisena superfosfaattina (150 mg kg⁻¹ maata). Kontrollikäsittelyyn ei lisätty jätevesilietepohjaisia tuotteita, vaan ainoastaan epäorgaaniset ravinteet. Jokaisesta käsittelystä oli kolme rinnakkaista. Koeastioihin lisättiin 25 kappaletta kauransiemeniä tai 300 mg raiheinänsiemeniä ja siemenet peitettiin niille varatulla maamäärällä. Kaura harvennettiin 20 oraaseen yksilehtivaiheessa. Kastelu suoritettiin deionisoidulla vedellä. Korrenkasvun alkuvaiheessa kauralle annettiin lisätyyppä 1000 mg astiaa kohden. Ammonium- ja nitraattityyppä annettiin samassa suhteessa kuin kokeen perustamisen yhteydessä.

Kaurasta korjattiin koko biomassaa leikkaamalla 2 cm maanpinnan yläpuolelta jyväsadon tuleennutua. Biomassa kuivattiin 65 °C:ssa, jyvät eroteltiin tähkäpuimurilla ja punnittiin jyvä- ja olkisato. Jyväsadon ravinne- ja raskasmetallimääritykseen jauhettiin 5 gramman näyte ja loput varattiin haitta-aineanalyysiin. Oljista määritettiin myös ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet, mutta ei orgaanisia haitta-aineita. Raiheinästä korjattiin yksi sato, punnittiin tuoresato, otettiin noin 20 gramman osanäyte kuiva-aine- (65 °C) ja alkuainemäärityksiin. Loppu raiheinäsadosta pakastettiin (-20 °C) haitta-aineanalyysijä varten.

Kasvatuskokeiden jälkeen jokaisesta koeastiasta otettiin edustava maanäyte koko koeastian syvyydeltä ja ilmakeivattiin. Viljavuusanalyysi suoritettiin jokaiselle maanäytteelle, mutta haitta-aineanalyysijä varten rinnakkaisten koeastoiden näytteet yhdistettiin yhdeksi näytteeksi.

3.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.2.1. Alkuaineiden ja haitta-aineiden pitoisuudet

Lietevalmisteiden sekä pyrolysoidun mädätteen ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet olivat samalla tasolla kuin vuotta aikaisemmin noudetuissa näytteissä, joista tutkittiin fosforin käyttökelpoisuus kasvatuskokeissa (Taulukko 2).

Kaikki tarkastellut orgaaniset haitta-aineet määritettiin HSY:n mädätteestä, pyrolysoidusta HSY:n mädätteestä, kompostoidusta mädätteestä (HSY) sekä Oulun kemiallisesti käsitellystä mädätteestä (Kemicond). Näiden lisäksi PBDE-yhdisteet määritettiin 16:sta eri puolilta Suomea peräisin olevasta lietevalmisteesta. Kaikissa tuotteissa havaittiin tutkittuja yhdisteitä (Taulukot 6 ja 7). Pyrolysoitua mädätettä lukuun ottamatta runsain PBDE-kongeneeri näytteissä oli BDE-209 (87–99 % kaikkien kongeneerien summapitoisuudesta). PFAA-yhdisteistä suurimpana pitoisuutena havaittiin PFOS kaikissa muissa tuotteissa paitsi kompostissa, jossa karboksyylihapot (mm. PFHxA, PFOA) oli enemmän.

Taulukko 6. PFAA- ja PAH-yhdisteiden sekä lääkeaineiden pitoisuudet kuiva-ainetta kohden ($\mu\text{g kg}^{-1}$) mädätteessä, jätevesilietepohjaisissa maanparannusaineissa sekä kasvatuskokeessa käytetyssä hietamaassa lähtölanteessa.

	Lyhenne	Mädäte (HSY)	Pyrolysoitu mädäte (HSY)	Metsäpirtti	Kemicond	Hietamaa
	kuiva-ainepitoisuus	30,3 %	100,0 %	30,8 %	31,2 %	90,8 %
PFAA-yhdisteet	PFBA	0.10	<0.05	0.99	<0.05	<0.05
	PFPeA	0.19	<0.05	1.46	<0.05	<0.05
	PFHxA	1.43	0.60	9.97	0.19	<0.05
	PFHpA	0.18	0.13	1.37	0.08	<0.05
	PFOA	0.97	0.55	9.20	0.29	0.06
	PFNA	0.22	0.27	1.28	0.09	<0.05
	PFDA	1.28	0.18	4.89	0.42	<0.05
	PFUnDA	1.31	0.06	4.96	0.24	<0.05
	PFDoA	1.55	0.06	3.42	0.48	<0.05
	PFTTrDA	0.62	<0.03	2.18	<0.05	<0.05
	PFTeDA	0.57	<0.04	0.90	0.15	<0.05
	PFHxDA	0.24	<0.15	0.28	<0.15	<0.15
	PFODA	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11	<0.11
	PFBS	<0.05	0.15	1.69	<0.05	<0.05
	PFHxS	<0.05	0.07	0.17	0.26	<0.05
	PFHpS	<0.05	0.11	<0.05	<0.05	<0.05
	PFOS	4.35	5.06	3.68	2.64	0.07
	PFDS	0.17	0.26	0.06	0.08	<0.05
PAH-yhdisteet	MNA	62	44	23	21	<5
	2MNA	94	56	25	34	8.8
	ANTR	84	18	19	<5	<5
	ANP	88	<5	16	6.3	<5
	ANY	11	<5	12	<5	<5
	BAA	130	100	74	25	8.5
	BAP	100	110	57	11	14
	BBF	250	200	170	72	14
	BEP	140	110	86	21	21
	BGHI	130	330	70	<10	140
	BKF	77	45	38	<10	<10
	DBAH	26	<10	20	<10	<10
	PHN	510	100	240	100	9
	FLUO	670	190	430	87	10
	FLUR	130	24	32	26	<5
	IP	150	290	72	<10	40
	CHRY	120	74	71	10	<10
	NAFT	0.082	0.053	0.01	0.016	<0.005
	PER	27	41	23	<10	<10
	TRF	43	34	36	25	<10
Lääkeaineet ja biosidit	E2	73.5	<6.0	20.7	<9.6	<3.3
	ATE	0.72	<0.40	<0.65	7.76	<0.22
	MET	22.7	<0.80	17.8	17.9	<0.44
	SOT	<33	<20	<33	<33	<11
	PCM	17.4	650	<16	<16	<5.5
	DCF	62.0	21.7	28.6	81.4	<5.5
	IBU	141	173	127	259	<75
	CBZ	26.4	<1.0	18.4	10.9	<0.55
	TCS	729	<100	492	419	<100
	TCC	176	<0.20	139	45.9	<0.10
	SDZ	1.0	<0.50	0.97	0.77	<0.26
	TET	366	<70	153	633	<35
	NOF	513	<40	94.3	<64	<22
	CIF	1210	<200	404	854	<100
	OF	541	<40	224	79.7	<20

Lääkeaineista antibiootteja sekä biosidi triklosaania havaittiin suurimpina pitoisuuksina mädätteessä, Metsäpirtin kompostissa sekä Kemicond-lietteessä.

PAH-yhdisteiden, lääkeaineiden ja biosidien suurimmat summapitoisuudet havaittiin HSY:n mädätteessä ja pääosin yhdisteiden pitoisuudet laskivat pyrolyysissä. Metsäpirtin kompostissa havaitut PAH-, lääkeaine- ja biosidipitoisuudet olivat pienempiä kuin mädätteessä. Alhaisempi pitoisuus ei välttämättä kerro aineen hajoamisesta, vaan voi selittyä myös laimenemisella, sillä kompostoinnissa mädätteeseen lisätään erilaisia seos- ja tukiaineita. Mädäte- ja kompostinäytteiden vertailu ei myöskään ole mielekäästä näiden yksittäisten näytteiden välillä, koska kompostin syötteenä ollut mädäte ei ollut samaa erää kuin tässä tässä hankkeessa tutkittu mädäte. PFAA- ja PBDE-yhdisteiden pitoisuudet olivat suurimmat kompostoidussa mädätteessä, mikä on linjassa aikaisempien hankkeiden tulosten kanssa (mm. Fjäder 2016). PFAA-yhdisteiden pitoisuudet usein kasvavat kompostoinnissa mikrobiotoinnin vaikutuksesta, kun niiden johdannaiset hajoavat muodostaen biologisesti hajoamattomia PFAA-yhdisteitä (Guerra ym. 2014; Kärrman ym. 2018). Myös kasvatuskokeissa käytetyssä hieta- maassa havaittiin PFAA-, PBDE- ja PAH-yhdisteitä (Taulukot 6 ja 7). Referenssinäytteenä toimivasta kivennäismaasta havaittujen yhdisteiden pitoisuudet ovat puolestaan peräsin todennäköisesti taustakuormituksesta.

Pyrolyysi pienensi lähes kaikkien yhdisteiden pitoisuuksia, mutta joidenkin yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet kasvoivat. Mädätteen massa pieneni pyrolyysissä, jolloin hajoamattomien ja haihtumattomien yhdisteiden pitoisuus kasvoi suhteessa tuotteen kuivapainoon. Siten yhdisteiden määrien muutoksen laskemisessa on huomioitu pyrolyysissä tapahtunut massahävikki, joka oli keskimäärin 15,6 % kuiva-ainetta kohti laskettuna. Pyrolyysissä on epäilty syntyvän erityisesti PAH-yhdisteitä. Tässä käsittelykokeessa kahden PAH-yhdisteen (bentso(ghi)peryleeni ja indeno(1,2,3-cd)pyreeni) määrä kaksinkertaistui pyrolyysissä ja kahden yhdisteen (bentso(a)pyreeni ja peryleeni) määrä ei juuri muuttunut. Useimpien PAH-yhdisteiden määrä oli noin 30 – 85 % pienempi pyrolyysin lopputuotteessa kuin pyrolyysin syötteenä käytetyssä mädätteessä. Myös PBDE- ja PFAA-yhdisteistä sekä lääkeaineista ja biosideista valtaosan pitoisuudet olivat pyrolyysituotteessa selvästi pienemmät kuin mädätteessä. PBDE-yhdisteistä BDE-209 on termisesti epästabiili. Sitä ei havaittu pyrolyysituotteessa ($<0,17 \mu\text{g kg}^{-1}$), vaikka mädätteessä sen pitoisuus oli $560 \mu\text{g kg}^{-1}$. Vastaavasti BDE-183:n määrä kaksinkertaistui (pitoisuus mädätteessä $0,57 \mu\text{g kg}^{-1}$ ja pyrolyysituotteessa $4,1 \mu\text{g kg}^{-1}$), mikä viittaa siihen, että sitä muodostui BDE-209 hajoamistuotteena. PFAA-yhdisteistä PFOS:n, PFNA:n ja PFDS:n määrä ei muuttunut pyrolyysissä, mutta muiden PFAA-yhdisteiden määrä väheni 40–96 %. Joidenkin näiden pysyvien yhdisteiden osalta on kuitenkin kyseenalaista, hajoavatko ne pyrolyysilämpötilassa (noin 300°C) vai kaasuuntuvatko ne käsittelyssä, sillä esimerkiksi PFOA:n kiehumispiste on 189°C . Lääkeaineista ibuprofeenin määrä ei muuttunut pyrolyysissä, mutta parasetamolin määrä moninkertaistui. Parasetamoli erittyy elimistöstä valtaosin glukuronihapon ja rikkihapon konjugaatteina. Pyrolyysikokeessa havaittu pitoisuuden kasvu voi selittyä sillä, että nämä konjugaatit pilkkoutuvat pyrolyysissä takaisin parasetamoliksi. Kemiallisesti käsiteltyssä mädätteessä pitoisuudet olivat matalammat kuin mädätteessä, mutta siinäkin havaittiin valtaosa tutkituista yhdisteistä. Koska kyse on yksittäisistä näytteistä ja eri laitosten lietteistä, kemiallisen käsittelyn vaikutuksesta orgaanisille haitta-aineille ei voi tehdä johtopäätöksiä.

Tutkittujen 19 lannoitevalmisteen PBDE-summapitoisuudet kuivapainoa kohti vaihtelivat 4,65–712 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Taulukko 7). Yhdessä kompostinäytteessä kaikkien PBDE-kongeneerien summa oli kuitenkin suurempi (3 540 $\mu\text{g kg}^{-1}$). Alhaisin PBDE-summapitoisuus mitattiin pyrolysoidusta mädätteestä (4,65 $\mu\text{g kg}^{-1}$). Näitä kahta näytettä lukuun ottamatta työssä ei havaittu selkeää eroa eri lannoitevalmistetyyppien PBDE-pitoisuuksien välillä.

Tutkittujen lannoitevalmisteen PBDE-pitoisuuksien vertailu kansainvälisesti on vaikeaa, koska kaikki tähän työhön sisältyneet tuotteet ovat jollakin tavalla käsiteltyjä puhdistamolietteitä, kun taas kirjal-

Taulukko 7. PBDE-yhdisteiden pitoisuudet kuiva-ainetta kohden ($\mu\text{g kg}^{-1}$) astiakokeissa käytetyssä hietamaassa, mädätteessä ja jätevesilietepohjaisissa maanparannusaineis-

sa.

Lyhenne	Kasvatuskokeen hietamaa	Viikinnäki mädäte	Viikinnäki pyrolysoitu	Metsäpirtti	Kemicond	Joensuu, komposti	Somero, komposti	Orivesi, komposti	Tampere, komposti	Hämeenlinna, komposti	Levi/Sirkka, komposti	Taivalkoski, komposti	Kokkola, komposti	Teuva, komposti	Turku, mädäte	Oulu, kemiallisesti käsitelty liete	Vihti, kemiallisesti käsitelty liete	Viitasaari, multa	Rovaniemi, multa	Jyväskylä, inframulta	Jyväskylä, ympäristömulta
k.a. (%)	90.8	30.3	100.0	30.8	31.2	68.1	26.8	31.8	36.1	36.5	31.5	56.3	27.1	38.5	31.9	26	28.6	96.7	79.2	70.9	78
BDE-28	<0.01	0.35	0.04	0.41	0.19	0.04	0.22	0.18	0.2	0.37	0.43	0.06	0.29	0.06	0.1	0.18	0.15	0.01	0.04	0.22	0.03
BDE-47	0.02	15	0.12	20	8.2	2.1	12	7.4	9.9	16	10	2.6	12	3.1	3.9	6.6	6.4	0.55	2.8	9.3	1.6
BDE-66	0.02	0.49	0.04	0.63	0.38	0.08	0.39	0.3	0.23	0.84	1.9	0.12	0.78	0.1	0.19	3.3	0.28	0.03	0.11	0.61	0.08
BDE-85	-	0.82	-	-	0.37	0.08	0.46	0.25	0.39	0.55	<0.01	0.1	0.71	0.15	0.22	0.2	0.3	0.03	0.15	0.46	0.09
BDE-99	<0.03	17	0.06	22	8.8	2.2	14	8.1	12	18	12	2.7	13	3.2	4.3	9.9	7.7	0.62	2.9	9.5	1.8
BDE-100	<0.02	1.5	<0.02	2.7	1.5	0.4	2.3	1.6	1.6	3	3	0.5	2.2	0.53	0.71	1.3	1.3	0.12	0.54	1.4	0.29
BDE-153	<0.05	2.2	<0.05	3	1	0.25	1.3	0.87	1.3	2.9	3.8	0.29	1.3	0.33	0.52	1.1	1.2	0.06	0.31	0.85	0.16
BDE-154	<0.05	1.7	<0.05	2	0.73	0.19	1.2	0.67	0.76	1.8	1.8	0.23	0.81	0.27	0.38	0.79	0.68	0.06	0.28	0.56	0.14
BDE-183	0.01	0.57	4.1	1.6	0.33	0.13	0.36	0.19	1.4	4.3	7.6	0.07	0.43	0.25	0.29	0.28	0.4	0.04	0.16	0.24	0.04
BDE-209	0.2	560	<0.17	660	360	51	220	180	380	380	3500	47	330	88	160	460	130	12	75	570	28

- = ei tulosta

lisuudessa esitetyt pitoisuudet ovat käsittelemättömien puhdistamolietteen/mädätteen pitoisuuksia. Puhdistamolietteen Σ PBDE-pitoisuudet vaihtelivat Euroopassa (Itävalta, Tšekki, Tanska, Saksa, Italia, Espanja, Ruotsi, Sveitsi) välillä 31,7–912 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Kim ym. 2017). Yhdessä italialaisnäytteessä Σ PBDE-pitoisuus oli 9 427 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Cincinelli ym., 2012). Tämän laitoksen toiminta-alueella oli tekstiiliteollisuutta. Kiinassa ja Etelä-Koreassa Σ PBDE-pitoisuudet puhdistamolietteenä olivat 17,5–6 630 $\mu\text{g kg}^{-1}$ ja Yhdysvalloissa ja Kanadassa 462,5–63 900 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Cincinelli 2012, Kim ym. 2017).

3.2.2. Astiakokeiden kaura- ja raiheinäsadot

Kasvatuskokeissa pyrittiin turvaamaan ravinteiden riittävyys sekä kauralle että raiheinälle epäorgaanisilla ravinnelisyksillä. Fosforiköyhään koemaahan lisättiin kaikkiin käsittelyihin fosforimäärä, jonka katsottiin riittävän tuottamaan optimisato (Ylivainio ym. 2019, tämä tutkimus). Maanparannuskompostit ja pyrolysoitu mädäte eivät vaikuttaneet tilastollisesti merkitsevästi kaurasatoon eikä sen laadua kuvaavaan tuhannen siemenen painoon (Taulukko 8). Ainoastaan kauran olkisato oli tilastollisesti kontrollikäsittelyä suurempi suuremmalla (300 t ha⁻¹) Metsäpirtin maanparannuskompostilisyksellä (Taulukko 8). Suurempi olkisato on todennäköisesti seurausta maanparannuskompostin typpilannoitusvaikutuksesta ja sen aikaansaamasta olkisadon kasvusta. Tästä on osoituksena olkien typpipitoisuuden 2,5-kertainen kasvu kontrollikäsittelyn verrattuna (Liite 28). Raiheinäsatoa Metsäpirtin multa (300 t ha⁻¹) ja pyrolysoitu mädäte (120 t ha⁻¹) kasvattivat tilastollisesti merkitsevästi (Taulukko 8). Tämäkin saattaa olla seurausta lisääntyneestä typen saatavuudesta. Näissäkin käsittelyissä raiheinän typpipitoisuus kasvoi, tosin ei tilastollisesti merkitsevästi (Liite 29). Toisin kuin tässä tutkimuksessa, pyrolysoidulla kananlannalla ei havaittu typpilannoitusvaikutusta Keskisen ym. (2020) tutkimuksessa.

Taulukko 8. Kauran jyvä- ja olkisadot ja tuhannen siemenen paino (tsp), g, sekä raiheinän kuiva-ainesato astiakokeissa, g. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

Käsittely ja laskennallinen lietepohjaisen materiaalin lisäys	Kaura			Raiheinä
	jyvästo	olkisato	tsp	sato
Kontrolli, ei lisäystä	66,8 ^a	63,1 ^a	36,8 ^a	40,0 ^a
Metsäpirtin multa				
30 t ha ⁻¹	65,0 ^a	65,7 ^a	36,5 ^a	41,4 ^a
300 t ha ⁻¹	72,1 ^a	74,4 ^b	36,4 ^a	52,7 ^b
Kemicond				
30 t ha ⁻¹	69,2 ^a	59,5 ^a	36,2 ^a	41,8 ^a
300 t ha ⁻¹	74,1 ^a	66,2 ^a	37,2 ^a	47,3 ^{ab}
Pyrolysoitu mädäte				
30 t ha ⁻¹	74,5 ^a	63,2 ^a	35,6 ^a	44,6 ^{ab}
120 t ha ⁻¹	71,0 ^a	65,3 ^a	35,7 ^a	53,7 ^b

Sekä kaura- että raiheinäsadot osoittivat, että käytetyt maanparannuskompostit tai pyrolysoitu mädäte eivät olleet toksisia kasveille huolimatta suurista lisäysmääristä. Käytetyn koemaan viljavuusluokka fosforin suhteen oli huono ja voimassa olevien ympäristökorvauskehtojen mukaan viljoille ja nurmille sallittu fosforilisäys vuositasolla on 34 ja 46 kg ha⁻¹. Jätevesilietepohjaisista lannoitteista kasveille käyttökelpoiseksi katsotaan 60 %, jolloin kokonaisfosforilisäys vuositasolla viljoille ja nurmille on 56,7 ja 76,7 kg ha⁻¹. Ottamalla huomioon nämä ympäristötukiehtojen suurimmat sallitut fosforilisäysmäärät viiden vuoden fosforintasaustajaksolla voidaan kerralla antaa viljoille ja nurmille fosforia 283,5 ja 383,5 kg ha⁻¹. Tällöin Metsäpirtin tai Kemicondin maanparannuskompostin lisäysmäärät olisivat 42,5 ja 63,6 t ha⁻¹ kauralle ja nurmelle vastaavasti 57,5 ja 86,1 t ha⁻¹. Ympäristötukiehtojen sallit-

tuihin lisäysmääriin nähden kasvatuskokeessa annettiin siten jopa seitsenkertainen määrä maanparannuskompostia.

Lannoitevalmistelainsäädännön mukaan vesi- tai ammoniumsitraattiliukoinen fosforilisäys saa maataloudessa olla korkeintaan 325 kg ha⁻¹ viiden vuoden käyttöjaksona annettaessa (<https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/400001/42474>). Hedley'n fraktioiden mukaan vesiliukoisesta fosforista Metsäpirtin maanparannuskompostin kokonaisfosforista oli 0,6 %, jolloin kokonaisfosforilisäys olisi noin 55 000 kg ha⁻¹ eli maanparannuskompostina lisäys olisi hehtaaria kohden 8300 tonnia, mikä olisi nelinkertainen määrä muokkauskerroksen (20 cm) maamassaan nähden.

3.2.3. Kaura- ja raiheinäsatojen ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet

Jätevesilietepohjaisten maanparannusaineiden ja pyrolysoitujen mädätteen vaikutus kauran makroravinnepitoisuuksiin (P, N, Ca, Mg, K, S) oli vähäinen. Ainoastaan fosforipitoisuus kasvoi tilastollisesti merkitsevästi suuremmalla Kemicond-maanparannusaineella (Liite 27). Sen sijaan olkien vastaaviin ravinnepitoisuuksiin maanparannusaineilla oli suurempi vaikutus (Liite 28). Tulokset osoittavat sen, ettei ravinteiden kokonaisotto suoraan vaikuta jyvien ravinnepitoisuuksiin ja ravinteiden siirtyminen jyvään on tarkasti säädeltyä.

Raiheinän makroravinnepitoisuuksiin (Liite 29) orgaanisilla lietevalmisteilla oli suurempi vaikutus kuin kauranjyvään. Suurempi Metsäpirtin maanparannuskompostilisäys kasvatti raiheinän kalsium- ja magnesiumipitoisuuksia, kun taas kemicond-käsitelty liete kasvatti sekä kauranolkien (Liite 28) että raiheinän rikkipitoisuutta (Liite 29) eniten. Kohonneet Ca-, Mg- ja S-pitoisuudet voivat olla seurausta niiden pitoisuudesta maanparannuskomposteissa. Kemicond-käsittelyssä jätevesilietteen hygienisoinnissa käytettävä rikkihappolisäys alentaa mädätteen pH:tta ja nostaa samalla sen rikkipitoisuutta. Suurempi lisäys kemicond-käsiteltyä lietettä laskikin maan pH:n alhaisimmalle tasolle muihin käsitelyihin nähden (Liite 37).

Kauran mikroravinnepitoisuuksiin (Fe, Mn, Zn, Cu, Mo) orgaanisilla maanparannusaineilla oli suurempi vaikutus kuin makroravinteisiin (Liite 27), mahdollisesti maan happamuuden muutosten vuoksi (Liite 36). Suurempi määrä kemicond-maanparannusainetta laski maan pH:n tasolle 5,4 kun taas vastaavasti pyrolysoitu mädäke kohotti maan pH:n arvoon 6,2. Maan pH vaikuttaa mangaanin (Mn) ja molybdeenin (Mo) liukoisuuteen maassa; mangaanin lisääntyessä ja molybdeenin heiketessä pH:n laskiessa. Kemicond-maanparannusaine nosti kauran Mn- ja laski Mo-pitoisuutta, kun taas pyrolysoitu mädäke laski Mn- ja nosti Mo-pitoisuutta (Liite 27).

Kauran sisältämistä haitallisista raskasmetallipitoisuuksista (Cd, Pb, Ni, Co, Cr, As) määrittämisrajan ylittivät ainoastaan Cd-, Cr- ja Ni-pitoisuudet ja osa analysoiduista Cr-pitoisuuksistakin oli alle määrittämisrajan (Liite 27). Orgaanisista lietepohjaisista tuotteista ainoastaan pienempi lisäys (30 t ha⁻¹) Kemicond-maanparannusainetta kohotti kauran olkien Cd-pitoisuutta, mutta suuremman lisäyksen kohdalla Cd-pitoisuus oli samalla tasolla kontrollikäsitelyn kanssa (Liite 28) ja raiheinän kohdalla jopa sitä pienempi (Liite 30). Pyrolysoitu mädäke alensi kauran (Liite 27) ja raiheinän (Liite 30) Ni-pitoisuutta ja Kemicond-maanparannusaine raiheinän Ni- ja Co-pitoisuutta (Liite 30).

3.2.4. Kaura- ja raiheinäsatojen orgaaniset haitta-ainepitoisuudet

Kauran jyvissä havaittiin kasvatuskokeissa pieniä, pääosin määrittämisrajan tuntumassa olevia pitoisuuksia PBDE-yhdisteitä yksittäisissä rinnakkaisnäytteissä (Taulukko 9). Myös kontrollimaassa kasvaneissa kaurissa havaittiin PBDE-yhdisteitä, eikä lisätyn lietetuotteen määrä korreloinut hyvin jyvissä havait-

Taulukko 9. PBDE-yhdisteiden pitoisuudet kauranjyvien kuiva-aineessa ($\mu\text{g kg}^{-1}$). Kursiivilla merkitty tulos on epävarma. Kustakin käsittelystä kolme rinnakkaista ja tulokset ilmoitettu kustakin rinnakkaisesta. MP = Metsäpirtin maanparannuskomposti, PYR = pyrolysoitu jättevesilietteen mädäte (HSY), KC = Kemicond-käsitelty jättevesiliete. Numero käsittelyn perässä kuvaa laskennallista lisäysmäärää (t ha^{-1}).

Näyte	Kuivapaino	Rasva-%	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	DDE-209
kontrolli	93,9 %	3,5 %	<0,01	0,12	<0,01	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
kontrolli	93,8 %	3,9 %	0,01	0,07	0,01	0,02	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	<0,02
kontrolli	93,9 %	4,0 %	<0,01	0,12	<0,01	0,02	0,36	0,02	0,09	<0,01	<0,01	<0,02
MP 30	93,9 %	4,6 %	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
MP 30	94,1 %	3,6 %	0,02	0,05	0,01	<0,01	0,02	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
MP 30	93,7 %	3,7 %	<0,01	0,13	<0,01	<0,01	0,04	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
MP 300	93,7 %	4,1 %	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
MP 300	93,6 %	4,3 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,02
MP 300	93,7 %	4,3 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
PYR 30	93,8 %	4,3 %	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
PYR 30	93,8 %	5,0 %	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
PYR 30	93,6 %	4,5 %	<0,01	0,04	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
PYR 120	93,9 %	4,5 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
PYR 120	93,7 %	4,5 %	<0,01	0,05	<0,01	0,01	0,03	0,02	<0,01	0,01	<0,01	<0,02
PYR 120	93,7 %	5,1 %	0,24	0,03	0,21	<0,01	0,21	0,15	0,30	0,18	0,30	<0,02
KC 30	93,8 %	4,6 %	<0,01	0,12	<0,01	0,03	0,55	0,03	0,07	0,02	<0,01	<0,02
KC 30	93,9 %	4,5 %	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
KC 30	93,8 %	4,4 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
KC 300	93,8 %	4,4 %	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
KC 300	93,9 %	4,2 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02
KC 300	93,8 %	4,2 %	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,02

tujen PBDE-pitoisuuksien kanssa. Yhdisteelle ja kauralle ominaisen kertyvyyskertoimen estimaatti jäi sen vuoksi epävarmaksi. Siten PBDE-yhdisteiden kertyvyys kauran jyviin on tämän tutkimuksen perusteella epävarmaa, mutta toisaalta peltomaan PBDE-yhdisteiden pitoisuuden nousu kertalaisyksiestä nykyisin pitoisuuksiin on melko pieni. Lopullinen kertymä riippuu sekä lisäysmääristä että kertyvyyskertoimesta, mikä vaatisi laajempaa tutkimusta. Kasvatuskokeessa käytetyt lietepohjaisten maanparannusaineiden lisäysmäärät olivat moninkertaiset sallittuihin lisäysmääriin nähden ja koe-maa on peräisin peltolohkolta joka on ollut viherkesannolla ja luonnonhoitopeltona vuodesta 2007 saakka. Lisäksi astiakokeessa kasvu on huomattavasti intensiivisempää kuin peltomittakaavassa, sillä ravinteiden ja kosteuden suhteen optimaalisissa olosuhteissa juuristo oli täyttänyt astian maatalavuuden, mahdollistaen siten tehokkaan ravinteiden sekä muiden saatavilla olevien yhdisteiden oton.

Kauran jyvissä havaittiin lääkeaineista ainoastaan karbamatsepiinia (Liite 38), ja raiheinissä sen lisäksi diklofenaakkia ja norfloksasiinia (Liite 39) yksittäisissä näytteissä. Kaurassa karbamatsepiinipitoisuus oli yli määritysrajan ainoastaan yhdessä rinnakkaisessa kolmesta suurimmalla lisäysmäärällä (300 t ha^{-1}) Metsäpirtin maanparannuskompostia ja Kemicond-käsiteltyä lietettä. Biosideja ei havaittu kasvinäytteistä. Tässä tutkimuksessa haitta-aineiden kasviinkertyminen voitiin todentaa ainoastaan lisäystarsoilla, jotka eivät ole käytännön viljelyssä sallittuja, ja joista matalampien tasojen kertyvyys on ekstrapoloitava.

Tämän hankkeen tulosten perusteella tutkittujen yhdisteiden kasvikertyvyyksistä ei voida vetää selviä johtopäätöksiä, vaan lääkeaineiden ja PBDE-yhdisteiden kasvikertyvyyden luotettavaan arviointiin tarvitaan lisäkokeita. Lisäkokeet tulee tehdä erilaisilla pitoisuuksilla analytiikan tarkkuus huomioon ottaen, jotta mahdollinen kertyminen tai kertymättömyys kasveihin voidaan luotettavasti osoittaa. Usein laboratoriossa tehtävissä kertyvyyskokeissa suositetaan selvästi suurempien pitoisuuksien testaamista, kuin mitä pelloille todellisuudessa saa levittää. Liian pienillä pitoisuuksilla ei potentiaalista biokertyvyyttä saada selville, mikäli pitoisuudet testattavassa kasvissa jäävät alle määritysrajan. Tällöin ei pystytä arvioimaan biokertyvyyskertoimia, eikä saada tietoa aineen kertyvyydestä. Kasvikertyvyyttä kuvaa osamäärä, joka on kasvista mitatun ja kasvumaan pitoisuuden suhde, kertyvyyskerroin.

Tässä tutkimuksessa kertyvyyskertoimen arvioinnin tarkkuutta heikentävät mm. pieni koeaineisto, rinnakkaisnäytteiden suuri hajonta, määritysten riittämätön tarkkuus ja suuri mittausepävarmuus, laskennassa käytettyjen lietetuotteiden ja niistä havaittujen pitoisuuksien vaihtelevuus, sekä kokeessa käytetyt annostasot ja niiden lukumäärä. Kertyvyyskertoimen yleistettävyyteen vaikuttavat kokeessa käytetyt kasvit ja kasvinosat.

3.2.5. Koemaan orgaaniset haitta-ainepitoisuudet

Kasvatuskokeiden maista määritettiin lääkeaineiden, PBDE ja biosidien pitoisuudet kokeen lopussa (Taulukko 10). Maiden pitoisuudet kokeen alussa laskettiin lietetuotteista määritettyjen pitoisuuksien sekä tuotteiden lisäysmäärän perusteella. Raiheinäsadosta määritettiin lääkeaineet ja biosidit, ja jauhetusta kauran jyivistä lisäksi PBDE-yhdisteet. Koska liete laimeni noin 100-kertaisesti pienimmällä lisäysmäärällä (30 t ha^{-1}) ja kymmenkertaisesti suurimmalla lisäysmäärällä (300 t ha^{-1}), kasvatusmaissa monen yhdisteen pitoisuudet jäivät alle määritysrajan (Taulukko 10). Vain kuusi kolmestatoista lääkeaineesta (metoprololi, ibuprofeeni, karbamatsepiini, tetrasykliini, siprofloksasiini ja ofloksasiini) havaittiin yhdessä tai useammassa kasvatusmaassa kokeen jälkeen, kun ainoastaan sotalolin pitoisuus oli alle määritysrajan kaikissa lietetuotteissa. Biosideista triklokarbaania oli havaittavia määriä kasvatusmaassa kokeen lopussa. PBDE-yhdisteistä valtaosan pitoisuudet olivat määritettävissä maista vielä kokeen lopussa.

Taulukko 10. Orgaanisten haitta-aineiden pitoisuudet koemaan kuiva-aineessa kasvatuskokeiden lopussa ($\mu\text{g kg}^{-1}$). Yli määrittäysrajan olevat pitoisuudet lihavoitu. NA = ei analysoitu.

Näyte	Kasvualusta, raiheinä						Kasvualusta, kaura							
	Kontrolli	MP 30	MP 300	PYR 30	PYR 120	KC 30	KC 300	Kontrolli	MP 30	MP 300	PYR 30	PYR 120	KC 30	KC 300
K.a., %	81,3	82,3	78,2	84,5	86,3	81,6	83,7	93,6	93,5	92,3	94,1	93,6	93,2	93,0
E2	<6,1	<6,1	<6,4	<5,9	<5,8	<6,1	<6,0	<5,3	<5,3	<5,4	<5,3	<5,3	<5,4	<5,4
ATE	<4,9	<4,9	<5,1	<4,7	<4,6	<4,9	<4,8	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3
MET	<0,15	<0,15	0,51	<0,14	<0,14	<0,15	0,31	<0,13	<0,13	0,34	<0,13	<0,13	<0,13	0,18
SOT	<4,9	<4,9	<5,1	<4,7	<4,6	<4,9	<4,8	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3	<4,3
PCM	<3,1	<3,0	<3,2	<3,0	<2,9	<3,1	<3,0	<2,7	<2,7	<2,7	<2,7	<2,7	<2,7	<2,7
DCF	<18	<18	<19	<18	<17	<18	<18	<16	<16	<16	<16	<16	<16	<16
IBU	<3,7	<3,6	<3,8	<3,6	3,8	<3,7	<3,6	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	<3,2	3,4
CBZ	<0,06	<0,06	0,49	<0,06	<0,06	<0,06	0,37	<0,05	<0,05	0,41	<0,05	<0,05	<0,05	0,26
SDZ	<18	<18	<19	<18	<17	<18	<18	<0,16	<0,16	<0,16	<0,16	<0,16	<0,16	<0,16
TET	<6,1	<6,1	<6,4	<5,9	<5,8	<6,1	9,6	<5,3	<5,3	<5,4	<5,3	<5,3	<5,4	7,3
NOF	<61	<61	<64	<59	<58	<61	<60	<53	<53	<54	<53	<53	<54	<54
CIF	<49	<49	96	<47	<46	<49	67	<43	<43	90	<43	<43	<43	<43
OF	<3,1	<3,0	8,2	<3,0	<2,9	<3,1	3,0	<2,7	<2,7	7,0	<2,7	<2,7	<2,7	3,4
TCS	<18	<18	<19	<18	<17	<18	<18	<16	<16	<16	<16	<16	<16	<16
TCC	<0,18	<0,18	4,6	<0,18	<0,17	0,50	2,0	<0,16	0,30	4,0	<0,16	<0,16	0,23	1,5
BDE-28	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,01	0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
BDE-47	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,03	0,05	0,74	0,02	0,03	0,07	0,25
BDE-66	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,02	<0,02	0,04	<0,02	0,02	0,02	0,02
BDE-85	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,02	<0,04	<0,04	<0,04	0,05	<0,04	<0,04
BDE-99	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,04	0,07	0,80	0,05	0,05	0,10	0,31
BDE-100	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0,03	0,03	0,12	0,03	0,03	0,04	0,07
BDE-153	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,05	<0,05	0,13	0,05	0,07	0,07	0,07
BDE-154	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
BDE-183	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,01	0,04	0,09	0,04	0,04	0,05	0,05
BDE-209	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	<0,17	12	20	<0,17	<0,17	<0,17	2,6

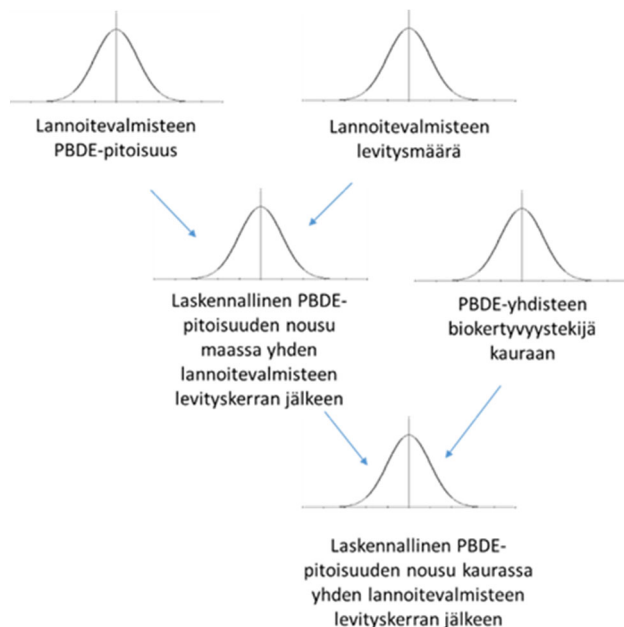
4. Elintarvikeriskinarviointi

Orgaaniset kierrätyslannoitevalmisteet saattavat sisältää erilaisia haitta-aineita ja voivat siten päätyä viljelymaahan kierrätyslannoitteiden käytön seurauksena. Osa haitta-aineista on ympäristössä pysyviä, jolloin ne saattavat myös kertyä maaperään. Osalla haitta-aineista on taipumus kertyä edelleen kasveihin ja siten elintarvikkeisiin. Elintarvikeriskinarvioinnissa selvitettiin PBDE-yhdisteiden pitoisuuden nousua viljelymaassa ja kertymistä kauraan puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden käytön seurauksena ja arvioitiin siitä aiheutuvaa elintarvikeriskiä.

4.1. Aineisto ja menetelmät

Työssä selvitettiin puhdistamolietepohjaisten lannoitevalmisteiden yhden levityskerran aiheuttama laskennallinen PBDE-pitoisuuden nousu viljelymaassa ja näiden yhdisteiden kertyminen kauraan. Pitoisuuden nousu viljelymaassa arvioitiin lannoitevalmisteiden PBDE-pitoisuuksien ja lannoitevalmisteiden levitysmäärän perusteella. Lannoitevalmisteiden levitysmäärä arvioitiin lannoitevalmisteiden fosfori- ja typpipitoisuuden ja nitraattiasetuksen ja ympäristötukiehtojen sallimien suurimpien fosforin ja typen käyttömäärien perusteella. PBDE-yhdisteiden pitoisuusaineistona käytettiin tässä hankkeessa määritettyjä pitoisuuksia ja kertyminen kauran jyviin määritettiin kasvatuskokeessa (Luku 3). Biokertyvyystekijä (BCF) laskettiin kauran ja kasvatukseen PBDE-pitoisuuksien (keskimääräisenä) osamääränä.

Edellä mainituista muuttujista muodostettiin jakaumat (Kuva 16). Jakaumien perusteella arvioitiin matemaattisesti PBDE-yhdisteiden laskennallinen pitoisuuden nousu viljelymaassa ja kaurassa yhden levityskerran jälkeen.



Kuva 16. Kaaviokuva PBDE-yhdisteiden biokertyvyyden arvioimiseksi.

4.1.1. Lannoitevalmisteiden levitysmäärän arviointi

Lannoitevalmisteiden levitysmäärät arvioitiin tutkittujen lannoitevalmisteiden fosfori- ja typpipitoisuuksien (Taulukko 11) ja lainsäädännön sallimien suurimpien fosforin ja typen käyttömäärien perusteella käyttäen sitä ravinnetta, jonka pitoisuus lannoitevalmisteessa antaa alhaisemman levitysmäärän. Kokonaistypen maksimikäyttömääräksi asetettiin nitraattiasetuksen määräämä 170 kg ha^{-1} . Ym-

päristötukiehtojen mukainen maksimikäyttömäärä fosforille on 34 kg ha⁻¹, mikä on ympäristökorvausjärjestelmän mukainen käyttömäärä viljoille maan viljavuusluokan ollessa huono. Jätevesilietteen kokonaisfosforista otetaan huomioon 60 %, joten mallinnettaessa käytettiin fosforilannoituksen enimmäismääränä 56,7 kg ha⁻¹. Käytännössä viljelysmaat eivät kuulu heikoimpaan fosforin viljavuusluokkaan Suomessa eli tässä työssä saatu arvio voidaan katsoa edustavan maksimaalista haitta-aineiden akkumuloitumista viljelysmaahan ja siten biosaatavuutta kasveille nykyisillä sallituilla lannoitusmäärillä. Käyttömäärään vaikuttaa myös mm. viljeltävä kasvilaji, mutta sitä ei huomioitu tässä tarkastelussa. On myös muistettava, että usein orgaanisia lannoitevalmisteita käytettäessä voidaan usean vuoden tarve levittää kerralla, jolloin levitys tapahtuu esimerkiksi viiden vuoden välein.

Taulukko 11. Tutkittujen lannoitevalmisteiden kuiva-ainepitoisuus ja hiilen (C), typen (N), fosforin (P) ja kadmiumin (Cd) pitoisuudet tuorepainoa kohden (t.p). Kadmiumin pitoisuudet laskettu myös kuiva-ainetta (k.a.) kohden. HUOM! Kompostiin lisätään kompostoinnin tukiaineita ja multa edelleen hiekkaa ja biotiittia.

Tuote	Kuiva-ainepitoisuus	C	P	N	Cd mg kg ⁻¹ t.p.	Cd mg kg ⁻¹ k.a.
	%	g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹	
Joensuu, komposti	68,1	32,1	2,47	2,05	0,10	0,14
Somero, komposti	26,8	111	3,49	8,26	0,16	0,58
Orivesi, komposti	31,8	121	5,22	8,86	0,16	0,49
Tampere, komposti	36,1	82,7	9,68	5,97	0,29	0,80
Hämeenlinna, komposti	36,5	121	6,76	7,93	0,29	0,79
Levi, komposti	31,5	72,4	4,36	4,71	0,06	0,19
Taivalkoski, komposti	56,3	52,6	3,19	3,35	0,10	0,18
Kokkola, komposti	27,1	64,6	6,49	5,46	0,32	1,17
Teuva, komposti	38,5	83,4	2,71	4,71	0,14	0,36
Metsäpirtti, komposti	30,8	89,8	7,18	7,50	0,40	1,30
Turku, mädäte	31,9	104	11,8	11,4	0,25	0,78
Oulu, kemiallisesti käsitelty mädäte (2017)	26,0	102	6,47	9,95	0,08	0,30
Vihti, kemiallisesti käsitelty mädäte	28,6	88,8	3,94	6,92	0,08	0,28
Oulu, kemiallisesti käsitelty mädäte (2016)	31,2	117	4,60	10,6	0,09	0,28
Viitasaari, multa	96,7	219	3,71	6,92	0,24	0,25
Rovaniemi, multa	79,2	27,3	1,85	2,13	0,06	0,08
Jyväskylä, inframulta	70,9	22,9	1,49	1,47	0,07	0,10
Jyväskylä, ympäristömulta	78,0	40,0	3,54	2,94	0,13	0,16
Pyrolysoitu mädäte	100	268	45,2	29,7	0,86	0,86
Minimi	26,0	22,9	1,49	1,47	0,06	0,08
Maksimi	100	268	45,2	29,7	0,86	1,30
Keskiarvo	48,7	95,8	7,05	7,41	0,20	0,48
Mediaani	36,1	88,8	4,36	6,92	0,14	0,30

Typen ja fosforin pitoisuus levitettävässä lannoitteessa oletettiin toisistaan riippumattomiksi. Typen ja fosforin pitoisuuksien jakauma viljelysmaahan levitettävässä lannoitteessa arvioitiin lannoitevalmisteista mitattujen pitoisuuksien perusteella käyttäen normaalijakaumamallia log10-pitoisuusmittauksille. Jakauman varianssi on summa sekä lannoitevalmisteiden välisestä että laitoksen tuottaman yhden lannoitevalmisteen pitoisuusvaihtelusta. Koska kultakin laitokselta on vain yksi mittaustulos, laitoksen sisäisen vaihtelun osuutta kokonaisvaihtelusta ei kuitenkaan voi erottaa.

4.1.2. PBDE-pitoisuuksien laskennallinen nousu viljelymaassa

Lannoitevalmisteiden kertalevityksen aiheuttama PBDE-yhdisteiden pitoisuuden nousu viljelymaassa arvioitiin lannoitevalmisteiden laskennallisen levitysmäärän ja teoreettisen keskimääräisen PBDE-pitoisuuden perusteella (Yhtälö 1).

Yhtälö 1

$$A = (L \times C_{\text{sludge}}) / (\rho_{\text{soil}} \times D_{\text{soil}} \times 10000 \text{ m}^{-2})$$

A = PBDE-yhdisteen laskennallinen pitoisuuden nousu viljelymaassa ($\mu\text{g kg}^{-1}$)

L = Lannoitevalmisteen satunnainen maksimikertalevitysmäärä (tn ha^{-1})

C_{sludge} = PBDE-yhdisteen teoreettinen keskimääräinen pitoisuus lannoitevalmisteessa ($\mu\text{g kg}^{-1}$)

ρ_{soil} = viljelymaan ominaispaino ($1\,200 \text{ kg m}^{-3}$)

D_{soil} = muokkauskerroksen paksuus (0,2 m)

Yksittäisen lannoitevalmisteen typen ja fosforin pitoisuudet ennustettiin niiden pitoisuusjakaumista (Posterioriprediktiiviset jakaumat $f(N)$, $f(P)$) jotka estimoitiin typen ja fosforin mitatuista pitoisuuksista. Kummankin satunnainen pitoisuus itsessään määrää suurimman sallitun käyttömäärän lannoitevalmisteelle, kg ha^{-1} (ehto: $\text{maxN kg ha}^{-1} \times N \text{ g kg}^{-1} \leq 170.000 \text{ g ha}^{-1}$, $\text{maxP kg ha}^{-1} \times P \times 0.6 \text{ g kg}^{-1} \leq 34.000 \text{ g ha}^{-1}$). Jotta kumpikaan kriteeri ei ylittyisi, määräytyy satunnainen yksittäinen maksimikäyttömäärä näistä pienimmän mukaan: $L = \min(\text{maxN}, \text{maxP})$. Täten maksimikäyttömäärä L saa simuloidun vaihtelujakauman, jossa L saa satunnaisia arvoja riippuen siitä mitkä ovat satunnaiset pitoisuusarvot N ja P (yhdelta erälle) ja kumman rajoitteen mukaan suurin käyttömäärä silloin määräytyy, jotta molemmat käyttöehdot täyttyvät. PBDE-yhdisteen teoreettinen keskimääräinen pitoisuus C on populaatiokeskiarvo, joka voidaan estimoida aineiston mitattujen pitoisuuksien perusteella. Teoreettiselle keskiarvolle C laskettiin epävarmuusjakauma (posteriorijakauma) josta sen lukuarvot simuloitiin. Yhtälö 1 kuvaa PBDE-yhdisteen teoreettisen (epävarman) keskipitoisuuden tuottamaa pitoisuutta vaihtelevissa maksimikertalevityksissä yhden levityskerran jälkeen. Viljelymaan lähtöpitoisuus oletetaan nolaksi.

Olettamusten (Luku 4.1.) ja tässä työssä mitattujen lannoitevalmisteiden fosfori- ja typpipitoisuuksien (Taulukko 11) perusteella arvioitu lannoitevalmisteiden laskennallinen suurin levitysmäärä oli $13,0 \text{ tn ha}^{-1}$ (Taulukko 12). Suurimmalle levitysmäärälle saadaan jakauma, joka määräytyy lannoitevalmisteiden fosfori- ja typpipitoisuuksien jakaumista.

Taulukko 12. Lannoitevalmisteiden fosfori- ja typpipitoisuuksien perusteella arvioitu lannoitevalmisteen laskennallinen suurin kertalevitysmäärä. Vaihtelujakauma perustuu fosfori- ja typpipitoisuuksien vaihteluun valmisteissa ja säädettyyn typen ja fosforin suurimpiin sallittuihin käyttömääriin.

Tunnusluku	Laskennallinen suurin levitysmäärä, tn ha^{-1} (tuorepainoa)
Keskiarvo	13,0
Mediaani	10,5
P2,5	2,2
P97,5	38,6

4.1.3. PBDE:iden biokertyvyyden määrittäminen

PBDE-yhdisteiden kauraan kertymisen arvioinnissa käytettiin kasvatusmaan laskennallisia PBDE-pitoisuuksia, jotka määritettiin lisättyjen lannoitevalmisteiden PBDE-pitoisuuksien (Taulukko 7) ja

niiden lisäysmäärän sekä kivennäismaasta mitattujen PBDE-pitoisuuksien avulla (Yhtälö 2). Koemaan laskennallisen PBDE-pitoisuuden ja kauran jyvistä mitattujen PBDE-pitoisuuksien (Taulukko 9) perusteella määritettiin yhdisteiden biokertyvyystekijä BCF kauraan lineaarisella regressiomallilla (joko absoluuttisilla arvoilla $Y = bcf * X$ tai logaritmisena $\log Y = \log bcf + \log X$). Lisäksi koemaiden PBDE-pitoisuus määritettiin kasvatuskokeen jälkeen. Maan laskennalliset ja mitatut pitoisuudet on esitetty taulukossa 13.

Yhtälö 2

$$C(K) = (C(L) * L + C(M) * M) / (L + M)$$

Missä:

$C(K)$ = Yhdisteen laskennallinen pitoisuus kasvatusmaassa ($\mu\text{g kg}^{-1}$ t.p.)

$C(L)$ = Yhdisteen mitattu pitoisuus lannoitevalmisteessa ($\mu\text{g kg}^{-1}$ t.p.). Jos tulos oli alle määrittäysrajan, arviossa käytettiin määrittäysrajaa vastaavaa arvoa.

L = Lannoitevalmisteen lisäysmäärä kivennäismaahan (kg)

$C(M)$ = Yhdisteen mitattu pitoisuus kivennäismaassa, johon ei ole lisätty lietevalmistetta ($\mu\text{g kg}^{-1}$ t.p.). LOQ-arvo jos tulos < LOQ.

M = Kivennäismaan massa (5,5 kg)

Taulukko 13. PBDE-yhdisteiden laskennalliset ja mitatut pitoisuudet kasvatusmaissa, $\mu\text{g kg}^{-1}$ ilmakuivaa maata kohden. Laskennalliset pitoisuudet on arvioitu käytetyn lannoitevalmisteen PBDE-pitoisuuden perusteella ottaen huomioon sen laimenemisen kasvatusmaahan sekoitussuhteiden mukaan. Arvioitaessa PBDE-yhdisteiden biokertyvyyskijää (BCF) kauraan käytettiin kasvatusmaan laskennallisia pitoisuuksia. Kasvatusmaiden PBDE-pitoisuus on myös mitattu kokeen päätyttyä. Näytteiden lyhenteet kuten taulukossa 9.

	Näyte	Kuiva- aine (%)	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Mitattu pitoisuus	Hietamaa	90,8	<0,01	0,02	0,02	-	<0,03	<0,02	<0,05	<0,05	0,01	0,18
	MP30	-	<0,01	0,09	0,02	-	0,08	0,01	0,01	0,01	0,02	2,52
	MP300	-	0,01	0,66	0,04	-	0,70	0,09	0,10	0,06	0,06	21,2
	PYR30	-	<0,01	0,02	0,02	-	<0,01	<0,02*	<0,02*	<0,05*	0,06	<0,18*
	PYR120	-	<0,01	0,02	0,02	-	<0,01	<0,02*	<0,02*	<0,05*	0,19	<0,18*
	KC30	-	<0,01	0,05	0,02	<0,01	0,03	0,01	<0,01	<0,01	0,01	1,48
Mitattu pitoisuus kokeen lopussa	KC300	-	0,01	0,28	0,03	0,01	0,28	0,05	0,03	0,02	0,02	11,8
	kontrolli	93,6	<0,01	0,3	0,02	0,02	0,04	0,03	<0,05	<0,05	<0,01	<0,16
	MP30	93,5	0,01	0,05	<0,02	<0,04	0,07	0,03	<0,05	<0,05	0,04	11,2
	MP300	92,3	0,02	0,68	0,04	<0,04	0,74	0,11	0,12	0,07	0,08	18,5
	PYR30	94,1	<0,01	0,02	<0,02	<0,04	0,05	0,03	0,05	<0,05	0,04	<0,16
	PYR120	93,6	<0,01	0,03	0,02	0,05	0,05	0,03	0,07	<0,05	0,04	<0,16
	KC30	93,2	<0,01	0,07	0,02	<0,04	0,09	0,04	0,07	<0,05	0,05	<0,16
	KC300	93,0	<0,01	0,23	0,02	<0,04	0,29	0,07	0,07	<0,05	0,05	2,42

MP30: Kompostoitu mädäte 30 tn ha⁻¹

MP300: Kompostoitu mädäte 300 tn ha⁻¹

PYR30: Pyrolysoitu mädäte 30 tn ha⁻¹

PYR120: Pyrolysoitu mädäte, 120 tn ha⁻¹

KC30: Kemiallisesti käsitelty mädäte 30 tn ha⁻¹

KC300: Kemiallisesti käsitelty mädäte 300 tn ha⁻¹

–: Ei tietoa

* BDE-100:n, BDE-153:n, BDE-154:n ja BDE-209:n pitoisuudet pyrolysoidussa mädätteessä olivat alle määrittäysrajan (Taulukko 5). Myös kivennäismaan BDE-pitoisuudet olivat alle määrittäysrajan. Näissä tapauksissa laskennallisen pitoisuuden arvioinnissa käytettiin määrittäysrajaa vastaavaa pitoisuusarvoa.

4.1.4. PBDE-yhdisteiden kertymisen mallintaminen

Pitoisuuksien $y[i,j]$ jakaumamalli lannoitevalmisteissa, yhdisteelle i , mittaukselle j on Gamma-jakauma: $\text{Gamma}(a[i],b[i])$ joka sopii kuvaamaan positiivisia mittausrvoja joiden jakauma on ylöspäin vino. Jokaisella yhdisteellä (i) on erilainen mittausten (j) pitoisuusjakauma. Jokaisen jakauman parametrit määrittävät keskiarvon ($\text{mean}[i]=a[i]/b[i]$) ja varianssin, joille voidaan laskea epävarmuusjakauma aineiston perusteella Bayes-menetelmällä, t.s. laskemalla parametreille posteriorijakauma. Tätä varten on valittava priorijakaumat jotka ovat mahdollisimman epäinformatiiviset koska priorista etukäetietoa parametreista ei oletettu. Priorijakaumat keskiarvolle $\text{mean}[i] \sim \text{Normal}(0,1/0,000001)C(0,)$ ja varianssin käänteisluvulle $1/\text{variance}[i] \sim \text{Gamma}(0,1,0,1)$ rajaavat mahdolliset arvot positiivisiin arvoihin. Datana malliin syötetään yhdistekohtaiset pitoisuusmittaukset $y[i,j]$. Mallista simuloidaan keskimääräisen pitoisuuden ($\text{mean}[i]=a[i]/b[i]$) epävarmuusjakauma jokaiselle yhdisteelle (t.s. keskiarvon posteriorijakauma).

Fosforipitoisuuden malli satunnaisille kertalannoituserille määritellään logaritimuunnetuille arvoille: $\log P[j] \sim \text{Normal}(m,v)$, jonka keskiarvon (m) ja varianssin (v) käänteisluvun priorit ovat $m \sim \text{Normal}(0,1/0,000001)$ ja $1/v \sim \text{Gamma}(0,01, 0,01)$. Typpipitoisuuden malli on vastaavanlainen. Datana käytetään mitattuja fosfori- ja typpipitoisuuksia $P[j]$ ja $N[j]$. Parametreille m & v voidaan siten simuloida epävarmuusjakauma (posteriorijakauma). Parametrien (m & v) epävarmuusjakaumasta simuloituja arvoja käytetään edelleen kun simuloidaan ennusteita yksittäisten satunnaisten lannoiteerien fosfori- ja typpipitoisuuksille. Malleista simuloidaan ennustettuja yksittäisten lannoituserien pitoisuuksia P^* ja N^* (t.s. posterioriprediktioivinen jakauma) jotka määrittelevät lopullisen käyttömäärän.

Suurin käyttömäärä hehtaarille on pienempi kahdesta luvusta: $\max \text{ kg ha}^{-1} = \min(\max \text{ kgP}, \max \text{ kgN})$ jossa $\max \text{ kgP} = (34.000 \text{ g/ha})/(0,6 \times P^* \text{ g/kg})$ ja $\max \text{ kgN} = (170.000 \text{ g/ha})/(N^* \text{ g/kg})$. Koska N^* ja P^* edellisen mukaan simuloidaan ennustejakaumista, myös $\max \text{ kg ha}^{-1}$ saa näiden jakaumien ja valintaehdon yhdessä määräämän jakauman.

Teoreettinen pitoisuus kertalevityksen jälkeen maaperässä määräytyy edellä simuloidusta suurimmasta käyttömäärästä ja arvioidusta keskipitoisuudesta kyseisessä lannoitteessa, jakamalla se kylvösyvyyden ja pinta-alan määräämään peltomaahan, oletetulla maan tiheydellä: $\text{pbde}[i] = \max \text{ kg ha}^{-1} \times \text{mean}[i] / (10000 \times 0,2 \times 1200)$. Tämä saadaan jakaumana johon vaikuttaa epävarmuusjakauma keskipitoisuudesta $\text{mean}[i]$ ja vaihtelujakauma käyttömäärästä $\max \text{ kg ha}^{-1}$.

Teoreettinen odotettu yhdisteen i pitoisuus kasvissa yhden satunnaisen kertalevityksen jälkeen on edellä saatu maaperäpitoisuus kertaa biokertyvyyskerroin: $\text{pbde}[i] \times \text{bcf}[i]$. Tämän jakaumaan heijastuu siten epävarmuus bcf-kertoimesta $\text{bcf}[i]$, epävarmuus yhdisteen keskimääräisestä pitoisuudesta lannoitevalmisteesta $\text{mean}[i]$, ja valmisteen suurimman käyttömäärän $\max \text{ kg ha}^{-1}$ vaihtelu.

Kasvatuskokeissa yhdisteen i kasvista mitatut pitoisuudet kokeessa j muodostavat aineiston $y[i,j]$ ja laskennalliset pitoisuudet kasvatuskoeaassa vastaavasti $x[i,j]$, yhdisteelle i , kokeessa j . Biokertyvyyskerroimen mukaan odotusarvo pitoisuudelle kasvissa on $x[i,j] \times \text{bcf}[i]$, ja jakaumamalli $y[i,j] \sim \text{Normal}(x[i,j] \times \text{bcf}[i], \text{var}[i])$. Priorijakaumat valittiin: $\text{bcf}[i] \sim \text{Normal}(0; 0,25)C(0,)$ ja $\sqrt{\text{var}[i]} = \text{SD}[i] \sim \text{Uniform}(0;5)$. Vaihtoehtoisesti logaritminen malli $\log y[i,j] \sim \text{Normal}(\log x[i,j] + \log \text{bcf}[i], \text{var}[i])$ jossa priorit samoin kuin edellä bcf-parametrille ja SD:lle. Mallista simuloidaan epävarmuusjakauma bcf:lle (t.s. posteriorijakauma lineaarisen mallin kulmakertoimelle datasta x & y). Odotetun kertyvyyden Bcf priorina on siis katkaistu normaali-jakauma, jonka P99% valittiin yltävän suurimpaan yksittäiseen mitattuun kertyvyysarvoon y/x , mikä rajaa pois kaikkein epärealistisimpia bcf-arvoja kun datapisteitä on vähän ja estimoinnin epävarmuus suurinta.

4.2. Tulokset ja tulosten tarkastelu

4.2.1. PBDE-pitoisuuden nousu viljelymaassa

PBDE-yhdisteiden laskennallisen pitoisuuden nousun keskiarvo, mediaani ja 2,5- ja 97,5-prosenttipisteet viljelymaassa lannoitevalmisteen yhden levityskerran jälkeen on esitetty taulukossa 14. Tässä työssä arvioidut laskennallisten pitoisuuksien mediaaniarvot olivat 0,3–75 % pitoisuuksista viljelymaista, jotka usean vuoden ajan olivat vastaanottaneet puhdistamolietettä 4–12 tn k.a. ha⁻¹ (Sellström 2005: BDE-47, -66, -85, -99, -100, -153, -154, -183, -196, -198, -203, -206, -207, -209 ja Österås 2015: BDE-47, -99, -100, -209). Tässä työssä arvioitu pitoisuuden nousu oli suurimmillaan noin kaksinkertainen verrattuna pitoisuuksiin ruotsalaisissa viljelymaissa (Taulukko 14), jotka eivät olleet vastaanottaneet jätevedenpuhdistamolietettä (Sellström ym. 2005). Yksittäisten, hyvin alhaisen vertailutulosten kohdalla prosenttiluku voi olla huomattavasti korkeampikin. Österås ym. (2015) mittaamat PBDE-pitoisuudet (BDE-47, BDE-99, BDE-100, BDE-209) viljelymaista, jotka eivät olleet vastaanottaneet puhdistamolietettä, olivat alle määrittäysrajan (0,05–1 µg kg⁻¹). Taulukossa 14 sulkeissa olevat luvut ovat tuloksia maatilalta, joka oli vastaanottanut lietettä puhdistamolta, jonka toiminta-alueella toimi tekstiiliteollisuutta (Sellström ym. 2005). Näissä maissa PBDE-yhdisteiden pitoisuudet näytteissä olivat varsin korkeat. Näitä tuloksia ei sisällytetty äskeiseen vertailuun. Espanjassa suoritettussa tutkimuksessa ΣPBDE-pitoisuus (BDE-47, -99, -100, 153, -154, -183, -196, -206, -207, -208, -209) vaihteli välillä 184–1 185 µg kg⁻¹ puhdistamolietettä saaneissa maissa (Eljarrat ym. 2008). Eräällä tutkimusalueella Ruotsissa PBDE-yhdisteiden pitoisuus oli edelleen korkea (BDE-209-pitoisuus 2 200 µg kg⁻¹), vaikka levityksestä oli kulunut jopa 20 vuotta (Sellström ym. 2005), mikä kuvastaakin hyvin yhdisteen pysyvyyttä maaperässä. Myös ilmalaskeuma voi olla PBDE-yhdisteiden lähde, mutta orgaanisen lannoitevalmisteen käyttö aiheuttaa PBDE-kuorman, joka voi olla jopa 400–1000 kertaisen ilmalaskeumaan verrattuna (Suominen ym. 2014).

Taulukko 14. Puhdistamolietepohjaisen lannoitevalmisteen yhden maksimikertalisäyksen aiheuttama laskennallinen PBDE-yhdisteiden pitoisuuden nousu viljelymaassa (ng kg⁻¹) valmisteen teoreettisen keskimääräisen yhdistepitoisuuden perusteella arvioituna. Maksimikertalisäykset simuloitu yksittäisten suurinten käyttömäärien jakauman mukaan. Teoreettinen keskimääräinen yhdistepitoisuus simuloitu epävarmuusjakaumasta. Taulukko sisältää myös vertailun maihin, jotka ovat tai eivät ole vastaanottaneet puhdistamolietettä. Monte Carlo -otos: 100 000.

	Laskennallinen pitoisuuden nousu* ng kg ⁻¹				Mitattu pitoisuus, ng kg ⁻¹					
	Keskiarvo	Mediaani	CI 2,5 %	CI 97,5 %	Levitetty liettemäärä, tn k.a. ha ⁻¹					
					4 ^{\$}	12 ^{\$}	4–12 ^{&}	ei lisäystä ^{&}	15–25 [#]	
Kongeneeri										
BDE-28	0,8	0,7	0,1	2,7	-	-	-	-	-	-
BDE-47	15,2	12,0	2,4	46,1	100–390	240–540	16–310 (450 000)	6,8–31	590–33 100	
BDE-66	1,4	1,1	0,2	4,4	-	-	<LOQ (6 000)	<LOQ	-	
BDE-85	1,1	0,8	0,2	3,4	-	-	<LOQ (17 000)	<LOQ	-	
BDE-99	17,1	13,4	2,7	52,3	98–370	260–520	20–420 (590 000)	11–58	-	
BDE-100	2,9	2,3	0,5	9,0	55–680	69–140	<LOQ–79 (120 000)	<LOQ–8,9	570–6290	
BDE-153	2,4	1,9	0,4	7,5	-	-	<LOQ–50 (52 000)	<LOQ–4,9	<LOQ–3680	
BDE-154	1,7	1,3	0,3	5,2	-	-	<LOQ–39 (46 000)	<LOQ	770–3420	
BDE-183	3,7	2,8	0,5	12,7	-	-	<LOQ (<LOQ)	<LOQ	1870–26 900	
BDE209	928,7	698,5	131,1	30790	1400–6000	2800–14000	28–1000 (2 200 000)	15–750	14 600–1 082 000	

^{\$}Österås ym. 2015

[&]Sellström ym. 2005

[#]Eljarrat ym. 2008

Maaperän laskennallinen PBDE-pitoisuuden nousu kertalisäyksessä on arvioitu olettaen maan tiheydeksi 1 200 kg m⁻³ ja kyntösyvyudeksi 0,2 m. Yhtälö: m µC/(100000*0,2*1200), jossa m = satunnainen suurin käyttömäärä joka toteutuisi riippuen fosfori- ja typpipitoisuuksien erosta (joille vaihtelujakaumat), ja µC = keskimääräinen yhdistepitoisuus (jolle epävarmuusjakauma) lannoitevalmistuksessa.

– Ei tietoa

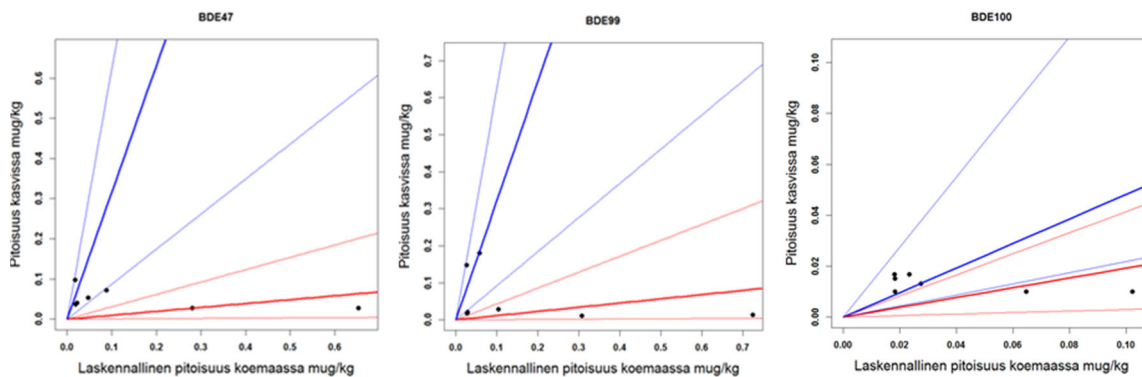
4.2.2. PBDE-yhdisteiden kertyminen kauraan kasvatuskokeissa

Selkeimmin kauraan kertyivät BDE-47, BDE-99 ja BDE-100. Muiden kongeneerien osalta kaurasta mitattiin vain yhdestä viiteen tai ei lainkaan yli määrittäysrajan olevaa pitoisuutta (Taulukko 9). Runsaimpana lannoitevalmisteissa esiintyneen BDE-209:n pitoisuus kaikissa kauranäytteissä oli alle määrittäysrajan, mikä osoitti, että sen biokertyvyys oli varsin vähäistä. Eri PBDE-yhdisteiden biokertyvyystekijät kauraan selviävät taulukosta 15. Kuten BCF:n epävarmuusjakauman P2,5- ja P97,5-arvoista selviää, biokertyvyyden epävarmuus on varsin suuri.

Taulukko 15. Absoluuttisten arvojen lineaarisesta mallista (rajoite $BCF > 0$) lasketut BCF-arvot BDE-47:n, BDE-99:n ja BDE-100:n kertymiselle kauraan, sekä logaritmisesta mallista lasketut. BCF-arvojen mediaani vastaa punaista (abs-malli) tai sinistä (log-malli) paksua suoraa kuvassa 24. Monte Carlo -otos 100 000.

BCF	2,5 %	mediaani	97,5 %
lineaarinen malli absoluuttisille arvoille			
BDE-47	0,01	0,10	0,31
BDE-99	0,01	0,11	0,43
BDE-100	0,03	0,19	0,41
additiivinen malli logaritmisille arvoille			
BDE-47	0,87	3,16	6,23
BDE-99	0,92	3,22	6,25
BDE-100	0,22	0,48	1,38

Kasviinkertymistulosten ristiriitaisuus vaikeutti tulosten tulkintaa. Biokertyvyystekijän arvioinnissa tavanomaisella normaalijakauman mukaisella lineaarisella regressiolla ($y_i \sim \text{Normaali}(bcf \cdot x_i, \sigma^2)$) BCF:n (eli suoran kulmakertoimen) luottamusvälin alaraja muodostuu negatiiviseksi. Tämä merkitsisi, että luottamusvälistä ei saada mielekäästä arviota. Saman mallin bayesläisessä estimoinnissa voi regressiomalliin lisätä rajoitteen, että suoran kulmakerroin (BCF) on aina positiivinen (Kuva 17, punainen suora on BCF:n epävarmuusjakauman mediaani). Normaalijakauman symmetrisyyden takia BCF:n yksittäiset ennustearvot saisivat kuitenkin edelleen osin negatiivisia arvoja, joten mallia ei voisi käyttää yksittäisten koetulosten ennustamiseen. Käyttäen logaritmistä asteikkoa $\log(y_i) \sim N(\log(bcf) + \log(x_i), \sigma^2)$ (Kuva 17, sininen suora on BCF:n epävarmuusjakauman mediaani) sekä vaatimus kulmakertoimen että yksittäisten mittausten positiivisuudesta toteutuvat. Logaritmisesta asteikon käyttäminen johtaa selvästi korkeampaan arvioon BDE-47:llä ja BDE-99:llä. Logaritmisesta mallin sovite on parhain pienten pitoisuuksien mittaustuloksille, kun taas absoluuttisen mallin sovite osuu paremmin suurten pitoisuuksien tuloksille. Logaritmisesta mallia käyttäen BCF:n mediaaniarvot olisivat 3–29 kertaisia nyt käytetyn rajoitetun lineaarisen mallin antamiin tuloksiin verrattuna.



Kuva 17. Mitatut PBDE-pitoisuudet ($\mu\text{g kg}^{-1}$) kasvatustaissa ja kaurassa. Kauran kolmen rinnakkaiskokeen keskiarvo on laskettu korvaamalla alle määrittärajaa jääneet tulokset määrittärajalla (upperbound). Mustat pisteet kuvaavat näin saatuja mitattuja PBDE-pitoisuuksia. Aineistoon on sovitettu kaksi regressiosuoraa: lineaarinen Bayes-malli absoluuttisille arvoille rajoituksella $\text{BCF} > 0$ (punainen) ja Bayes-malli logaritmisille arvoille (sininen). Paksu suora on posteriorijakauman mediaani, ohuemmat 95 % CI välit.

Biokertyvyystekijän (BCF) arvioinnissa ongelmaksi muodostui lisäksi kasvatuskokeen tulosten, erityisesti kaurasta mitattujen pitoisuuksien ristiriitaisuus ja suuri vaihteluväli. Alhaisilla maaperäpitoisuuksilla saadut kauran pitoisuudet ovat toisinaan korkeampia kuin korkeilla maaperäpitoisuuksilla saadut pitoisuudet. Osa mittauksista tukee suurta, osa pientä kerrointa, ja vähäinen pistejoukko ei asetu selkeästi millekään suoralle. Työssä on yhdistetty samaan kasvatuskokeeseen kolme erityyppistä lannoitevalmistetta (kompostoitu mädäte, kemiallisesti käsitelty mädäte, pyrolysoitu mädäte). Biokertyvyys näistä eri tuotetyypeistä saattaa olla niiden koostumuksen takia erilaista, mikä voi aiheuttaa epävarmuutta tuloksiin. Keskiarvoistamalla rinnakkais tulokset sekä kontrollimaan että kahden lisäyksen kasvatuskokeista (upper bound -tuloksien keskiarvo) saatiin jokaiselle kongeneerille 7 datapistettä (Kuva 17). Koemaan lähtöpitoisuus oli laskennallinen mikä sekin saattaa sisältää virhelähteitä. Vähäisen pistejoukon perusteella BCF jää epävarmaksi. Kokeessa oli vain kaksi tai kolme lisäyksen tasoa, mikä vaikeuttaa lineaarista sovittamista suuremmissa koepitoisuuksien skaalassa ja tulosten ekstrapolointia toisiin pitoisuustasoihin. Pienillä pitoisuustasoilla tuloksiin sisältyy myös enemmän epävarmuutta, kun suuri osa tuloksista jää mittausrajojen alle.

Kirjallisuustieto PBDE:iden kertymisestä viljaan on niukkaa. BDE-47:n ja BDE-99:n biokertyvyystekijät ohran olivat alle 0,002 (Hanslin & Eggen 2006). Ohrassa olleen BDE-209:n Hanslin & Eggen (2006) oletivat olleen peräisin ilmalaskeumasta eikä maaperästä. Tuorepainojen perusteella arvioituna PBDE-yhdisteiden (BDE-47, -99, -66, -85, -100, -153, -154 ja -209) biokertyvyystekijät porkkanaan olivat <0,13 ja kuiva-ainetietojen perusteella arvioituna ne vaihtelivat 0,21–0,94 (Hanslin & Eggen 2006). Biokertyvyystekijä oli suurin BDE-47:lle. BDE-209:lle biokertyvyys oli alle määrittärajaa. Toisen porkkanakokeen mukaan BDE-138:n biokertyvyystekijä kuiva-ainetta kohti laskettuna vaihteluväli oli 0,001–0,012 ja BDE-209 biokertyvyystekijän kohdalla 0,001–0,48 (Bizkarguenaga ym. 2016). Kuiva-ainetta kohti laskettuna eri PBDE-kongeneerien biokertyvyystekijät salaattiin vaihtelivat välillä 0,018–0,741 (Bizkarguenaga ym. 2016). Biokertyvyystekijä oli pienin BDE-99:lle ja korkein BDE-209:lle. Kuiva-ainepitoisuuksien perusteella lasketut PBDE-yhdisteiden biokertyvyystekijät pinaatille vaihtelivat välillä 0,23–2,68 (Navarro ym. 2017). Korkeimmat biokertyvyystekijät saatiin BDE-47:lle (1,59) ja BDE-17:sta (2,68). PBDE-yhdisteiden on todettu kertyneen myös kesäkurpitsaan ja retiisiin (Mueller ym. 2006), maissiin, kurpitsaan (Huang ym. 2011), tomaattiin (Navarro ym. 2017; Bizkarguenaga ym. 2016) sekä raiheinään (Huang ym. 2011). Biokertyvyystekijöiden vertailu eri tutkimusten välillä on vaikeaa, koska kasvatusolosuhteet ja esimerkiksi maaperän laatu voivat vaikuttaa PBDE-yhdisteiden biokertyvyys.

4.2.3. PBDE-pitoisuuden nousu kaurassa kertalevityksessä

Tässä työssä tutkittujen lannoitevalmisteiden kertalisäyksen aiheuttama laskennallinen PBDE-pitoisuuden nousu kaurassa esitetään taulukossa 16. Tuloksessa yhdistyy jakaumista simuloimalla kaikki edelliset osamallit: epävarmuus valmisteiden pitoisuuksista ja niiden käyttömääristä, sekä epävarmuus BCF-kertoimesta.

1. Yksittäisten laitosten ja tuotteiden pitoisuusmittausten tapauskohtainen vaihtelu on suurta, joten laskelma nojaa tässä tutkittujen laitosten keskuudessa nyt olleiden tuotteiden teoreettiseen PBDE-pitoisuuskeskiarvoon – ja sen epävarmuusjakaumaan.

2. Fosfori- ja typpipitoisuusjakaumat ja enimmäiskäyttömäärät määrittivät suurimman satunnaisen kertakäyttömäärän jakauman.

3. Kun käyttömäärä yhdistetään tuotteessa olevan PBDE-yhdisteen teoreettiseen pitoisuuskeskiarvoon ja arvioon sekoittumisesta maaperään, saadaan jakaumamuotoinen arvio maaperän pitoisuudelle kertalisäyksen jälkeen (Taulukko 16), olettaen ettei maassa alun perin ollut kyseistä yhdistettä. Jos maassa olisi ollut jo valmiiksi kyseistä yhdistettä, niin lopulliseen maaperän pitoisuusmäärään tulisi lisätä maassa jo ennalta ollut pitoisuus.

4. Näin simuloituja maaperäpitoisuuksia kerrottiin biokertyvyystekijällä, jolloin saadaan teoreettinen pitoisuus kaurassa. Biokertyvyystekijä puolestaan simuloitiin epävarmuusjakaumastaan, joka on saatuna tuloksena kasvatuskokeista. Ennusteessa kasviin kertymisessä oletetaan, että ennustettu pitoisuus on absoluuttinen, koska regressiomallissa kertyvyys tarkoittaa kertyvyyttä olemassa olleesta absoluuttisesta pitoisuudesta eikä esim. sen noususta tai muutoksesta.

Vertaamalla 2,5- ja 97,5-prosenttipisteitä havaitaan, että lopputuloksen epävarmuus on hyvin suuri, vaikka se nojaa keskimääräisiin lähtöpitoisuuksiin ja kertyvyksiin, ja kertalisäyksen määrän vaihteluun. Yksittäistapausvaihtelua lähtöpitoisuuksista tai kertyvyksistä ei siihen sisälly. Sen vuoksi tuloksia on pidettävä suuntaa-antavina. Loppullinen kertymän suuruus riippuu molemmista vaikutuksista: lannoitevalmisteen pitoisuudesta ja sen käyttömäärästä (edellä kohdat 1–3), ja biokertyvyystekijästä (edellä kohta 4). Molemmat sisältävät epävarmuuksia, etenkin biokertyvyystekijä.

Käyttömäärien simulointi perustui typen ja fosforin enimmäiskäyttömääriin ja se vastaisi maan viljavuusluokan olettamista huonoksi, mikä on Suomessa harvinaista. Siten käytetty malli saattaa yliarvioida lannoitevalmisteen levitysmäärää, joten arvio PBDE-yhdisteiden määrästä kaurassa saattaa siltä osin olla yliarvioitu.

Taulukko 16. Tässä työssä tutkittujen lannoitevalmisteiden kertalisäyksen aiheuttama laskennallinen PBDE-pitoisuus kaurassa. Monte Carlo -otos 100 000. Logaritmisen mallin perusteella arvioituna mediaanipitoisuudet ovat kongeneerista riippuen 3–29-kertaisia absoluuttisten arvojen mallin tuloksiin verrattuna.

ng kg ⁻¹ (t.p.)	2.5 %	mediaani	97.5 %
BDE-47 (abs-malli)	0,05	1,05	7,07
BDE-99 (abs-malli)	0,06	1,38	10,5
BDE-100 (abs-malli)	0,04	0,41	2,12
BDE-47 (log-malli)	4,98	35,5	173
BDE-99 (log-malli)	5,75	40,7	197
BDE-100 (log-malli)	0,18	1,11	5,95

Elintarvikkeiden PBDE-pitoisuuksia on määritetty paljon, mutta analyysit ovat usein keskittyneet eläinperäisiin elintarvikkeisiin, koska ne ovat tärkein PBDE-yhdisteiden lähde. Suomalaisista elintar-

vikkeista PBDE-yhdisteiden (BDE-47, -99, -100, -153, ja -154) upper bound -summapitoisuus oli suurin kalatuotteissa (850 ng kg^{-1}) ja rasvoissa (220 ng kg^{-1}) (Kiviranta ym. 2004). Pitoisuus viljatuotteissa oli 15 ng kg^{-1} (Kiviranta ym. 2014). Puolalaisten viljatuotteiden (velli, hiutaleet, jauhot, pasta, leseet, puuro, välipalat, leipä) PBDE-kokonaispitoisuus ($\Sigma 14$ BDE-28, -47, -99, -100, -153, -154, -183, -209) oli $112 \pm 80 \text{ ng kg}^{-1}$, ja muiden kongeneerien kuin BDE-209:n pitoisuus oli $15 \pm 6 \text{ ng kg}^{-1}$ (Roszko ym. 2014). Vaihtelu tuoteryhmien välillä oli suurta: pitoisuus vellissä oli 8 ng kg^{-1} , ja leseissä $2\,000 \text{ ng kg}^{-1}$ (Roszko ym. 2014). Yhdysvalloissa Σ PBDE-pitoisuus (BDE-47, -99, -100, -153, -154) paahdetussa kaurassa oli $28,8 \text{ ng kg}^{-1}$ t.p. (Schechter ym. 2009). Vehnäleivässä näiden kongeneerien summapitoisuus oli $90,0 \text{ ng kg}^{-1}$ t.p. Muiden tutkittujen kongeneerien (BDE-17, -28, -49, -66, -71, -77, -85, -99, -119, -126, -138, -156, -183, -184, -191, -196, -197, -206, -207, -209) pitoisuus näytteissä oli alle määrittämissä. Ruotsalaisessa tutkimuksessa vehnän BDE-47, -99, -100 ja -209:n pitoisuudet olivat alle määrittämissä ($200\text{--}5\,000 \text{ ng kg}^{-1}$ t.p.) kun puhdistamolietettä oli käytetty kuiva-aineena $4\text{--}12 \text{ tn ha}^{-1}$ neljän vuoden välein (Österås ym. 2015). Nämä määrittämissä olivat huomattavasti korkeampia kuin tässä työssä esiintyneet pitoisuudet. Vertailua viljatuotteisiin vaikeuttaa se, että viljatuotteisiin on saatettu käyttää esimerkiksi rasvaa, joka voi nostaa PBDE-pitoisuutta tai vettä, joka laimentaa pitoisuutta. Lisäksi on huomioitava, että tässä työssä kauran PBDE-pitoisuus mitattiin kokonaisista jyvistä, mutta valmiissa elintarvikkeissa kaura on yleensä jollakin tavalla käsiteltyä.

PBDE-yhdisteiden (BDE-47, -99, -100, -153, ja -154) yhteenlaskettu saanti Suomessa oli 44 ng vrk^{-1} (Kiviranta ym. 2004). Tärkeimmät saantilähteet olivat kala (55 % kokonaissaannista) ja rasvat (15 % kokonaissaannista). Viljatuotteiden osuus ($2,8 \text{ ng vrk}^{-1}$) oli 6,2 % kokonaissaannista ja vihannesten osuus ($1,9 \text{ ng vrk}^{-1}$) 4,3 % (Kiviranta ym. 2004). Vaikka PBDE-yhdisteiden pitoisuus viljatuotteissa oli alhaisempi kuin esimerkiksi kiinteissä maitotuotteissa, PBDE-yhdisteiden saanti viljatuotteista ($2,8 \text{ ng vrk}^{-1}$) oli suurempi kuin kiinteistä maitotuotteista ($1,1 \text{ ng vrk}^{-1}$), johtuen todennäköisesti viljatuotteiden suuremmasta käyttömäärästä.

Vuodesta 2000 vuoteen 2006 PBDE-yhdisteiden (BDE-47, -99, -100, E-153, -154 ja -183) saanti ravinnosta Espanjassa laskettuna 60 kg painavalle aikuisille oli pudonnut määrästä $97,3 \text{ ng vrk}^{-1}$ määrään $75,4 \text{ ng vrk}^{-1}$ (Domingo ym. 2008). Saanti viljatuotteista oli kuitenkin noussut määrästä $7,4 \text{ ng vrk}^{-1}$ määrään $9,4 \text{ ng vrk}^{-1}$ (Domingo ym. 2008). Tämä selittyy osittain kasvaneella viljatuotteiden kulutuksella (vuonna 2000 206 g vrk^{-1} ; vuonna 2006 224 g vrk^{-1}).

5. Jätevesilietepohjaisten lannoitevalmisteiden ekotoksisuus

5.1. Tausta

Lietetuotteiden lyhytkestoista ympäristövaaraa tutkittiin akuutilla valobakteeritestillä. Kokeella pyrittiin selvittämään erityisesti pyrolysoidun tuotteen toksisuus verrattuna käsittelemättömään lietteeeseen. Kineettinen valobakteeritesti on pääasiassa sameille tai värillisille vesiuutteille ja esimerkiksi sedimenteille käytettävä toksisuustesti, jota sovellettiin kustannustehokkuuden ja testin seulovan luonteen vuoksi tässä tutkimuksessa myös lietenäytteille.

Genotoksisuutta mittaava, nopea ja kustannustehokas UMU-testi valittiin tutkimukseen kartoittamaan lietetuotteiden mahdollista pitkäaikaista ympäristöriskiä. Genotoksisuus tarkoittaa tutkittavan näytteen kykyä vahingoittaa DNA:ta ja aiheuttaa mutaatioita.

Toksisuustestit tehtiin konsentroiduilla uutteeilla ja lisäksi tuoreella naudan lietelannalla, jotta voitiin verrata lietetuotteiden toksisuutta lietelannan toksisuuteen.

5.2. Materiaalit ja menetelmät

5.2.1. Näytteiden uutto

Testatut lietevalmistenäytteet on esitelty taulukossa 17. Lietevalmisteiden lisäksi kokeet tehtiin lietelannalla, joka oli peräisin Luken Minkiön tutkimusnavetasta. Valobakteeritestiä varten lietteet uutettiin standardin ISO 21338 mukaisesti (20 % seos, liete + uuttoliuos, joka on 2 % NaCl). Toksisuustestiin käytettiin sekä pakastettua tuoretta että kylmäkuivattua lietettä. Tuoreena analysoitavat näytteet pakastettiin (-20 °C), jotta uutto voitiin tehdä kaikille näytteille samaan aikaan. Kylmäkuivausta varten näyte punnittiin ja pakastettiin (-20 °C) astioissaan yön yli, minkä jälkeen ne kuivattiin kylmäkuivurilla. Kylmäkuivatut näytteet säilytettiin huoneenlämmössä. Testiä varten tuorepakastettuja näytteitä punnittiin 2 g ja kylmäkuivattua määrä, joka vastaa 2 g tuoretta näytettä. Näytteet uutettiin 2 % NaCl-liuoksella. Uutteista tehtiin laimennossarja, joka mitattiin luminometrillä (Berthold Sirius Single Tube Luminometer). Testipitoisuudet olivat 50 %, 25 %, 12,5 %, 6,25 % ja 3,125 % alkuperäisestä näytteestä. Testipitoisuudet valittiin niin, että inhibitoaste olisi optimaalisin (20–80 % inhibitio) käytettävällä laimennossarjalla.

UMU-testiin käytettiin niin ikään sekä pakastettua että kylmäkuivattua lietettä. Tuorepakastetut ja kylmäkuivatut näytteet uutettiin paineistetulla nesteuutolla (Dionex ASE). Kylmäkuivattuja ja tuoreita näytteitä punnittiin uuttokyvettiin n. 10 g tai kuinka paljon saatiin uuttokyvettiin mahtumaan (taulukko 18). Näytteet uutettiin heksaanilla ja tämän jälkeen dikloorimetaanilla. Uutteet haihdutettiin kuiviin ja tämän jälkeen näytteeseen lisättiin 0,5 ml:aa dimetyylisulfoksidia (DMSO). DMSO-liuoksen väri arvioitiin aistinvaraisesti ja tulokset on koottu taulukkoon 18. Näytteet säilytettiin +4 °C:ssa UMU-testin alkuun saakka. Tuorepakastettu lietelanta sentrifugoitiin sulatuksen jälkeen kiintoaineksen poistamiseksi ja supernatantin pH-säädettiin testiin sopivaksi ($7,0 \pm 0,2$). Lietelanta pipetoitiin suoraan testiin ilman uuttoa.

5.2.2. Valobakteeritesti

Valobakteeritesti perustuu gramnegatiivisen bakteerin *Aliivibrio fischeri* (aiemmin nimeltä *Vibrio fischeri*) valontuoton vähenemiseen (inhibitioon), kun se altistuu haitallisille aineille (ISO 11348-3 standardi). Valontuoton inhibitio kertoo vakavasta häiriöstä bakteerin välttämättömässä aineenvai-

dunnassa. Valobakteeritesti on alun perin suunniteltu vesinäytteille, mutta siitä on kehitetty myös kineettinen testiversio. Kineettinen valobakteeritesti soveltuu kiinteiden näytteiden vesiuutteille ja sedimenttinäytteille, koska se ei ole niin herkkä näytteen sameudelle ja tummalle värille kuin ei-kineettinen akvaattisesta toksisuudesta kertova testi. Kineettistä valobakteeritestiä sovellettiin tässä tutkimuksessa lietteille ja lietetuotteille.

Valobakteeritestissä mitataan näytteiden valontuottoa ja verrataan sitä kontrollin valontuottoon. Valontuoton väheneminen ilmoitetaan EC_{50} -arvona kullekin lietetuotteelle. EC_{50} -ilmoittaa prosentteina sen uutepitaisuuden, jossa valontuotto on puolet kontrollinäytteen valontuotosta. Valontuoton inhibition ja EC_{50} -arvon laskukaavat ovat liitteessä 41.

Taulukko 17. Lietenäytteiden säilytys ja uuttotiedot.

Näyte	Mitä/mistä	Säilytys	Uutot	Tehdyt testit
HSY Metsäpirtti	Kompostoitu liete (maanparannuskomposti)	Tuore-pakastettuna sekä kylmäkuivattuna	Valobakteeritesti: 2 % NaCl UMU-testi: heksaani ja dikloorimetaani	Valobakteeri UMU
Kemicond	Oulun kemiallisesti käsitelty jätevesiliete	Tuore-pakastettuna sekä kylmäkuivattuna	Valobakteeritesti: 2 % NaCl UMU-testi: heksaani ja dikloorimetaani	Valobakteeri UMU
HSY mädäte	HSY:n mädätetty ja kuivattu liete	Tuore-pakastettuna sekä kylmäkuivattuna	Valobakteeritesti: 2 % NaCl UMU-testi: heksaani ja dikloorimetaani	Valobakteeri UMU
HSY Pyrolysoitu mädäte	Pyrolysoitu liete (mädätetty, kuivattu)	Huoneen lämmössä (valmiiksi kuiva)	Valobakteeritesti: 2 % NaCl UMU-testi: heksaani ja dikloorimetaani	Valobakteeri UMU
Lietelanta	Tuore naudan lietelanta (Minkiö)	Tuorepakastettuna sekä kylmäkuivattuna	Valobakteeritesti: 2 % NaCl UMU-testi: heksaani ja dikloorimetaani (kylmäkuivattu) sentrifugoitu ja pH-säädetty lietelanta (tuorepakastettu)	Valobakteeri UMU

5.2.3. Umu-testi

UMU-testi kertoo näytteen perimämyrkyllisyydestä, eli onko näytteellä taipumus vahingoittaa DNA:ta ja aiheuttaa mutaatioita. Umu-testi suoritettiin -S9 ja +S9 -menetelmillä standardin ISO 13829:2000E mukaisesti. Umu-testi perustuu genotoksisten aineiden aiheuttamaan bakteerin, tässä tapauksessa *Salmonella enterica subsp. enterica* TA1535/pSK1002:n, perimävaurioita korjaavan ns. SOS-järjestelmän aktivoitumiseen. Yksi SOS-järjestelmään kuuluvista geeneistä on umuC-geeni. Kyseinen umuC-geeni on yhdistetty β -galaktosidaasin lacZ-geeniin, jolloin SOS-järjestelmän aktivoitumisen seurauksena syntyy β -galaktosidaasi-entsyymiä. Tämän aktiivisuus määritetään ja verrataan kontrollien, eli ilman tutkittavaa ainetta kasvatetun bakteerin, β -galaktosidaasi-aktiivisuuteen. Testi tehdään metabolisen aktiivoinnin kanssa (+S9, rotan maksa) ja ilman sitä (-S9). UmuC-geeni on kirjainlyhenne UV-mutageneesi geeni C:lle. Geenin tuottaminen on bakteerisolun keino korjata DNA-vaurioita. -S9-testillä mitataan näytteen suoraan mahdollisesti aiheuttama perimämyrkyllisyys (genotoksisuus), kun taas +S9-testillä määritetään metabolisen aktiivoinnin (rotan maksasolut) kautta mahdollisesti syntyvä perimämyrkyllisyys. Testituloksia ei voi tulkita, mikäli näytteet ovat testiorganismille solutoksia ja estävät solun normaalin kasvun.

Testi suoritettiin heksaanilla ja dikloorimetaanilla uutetuille näytteille. Uutteiden näytemäärä on esitetty taulukossa 2. Uutteita säilytettiin +4 °C testiin asti. UMU-testissä (-S9) näytteet testattiin laimennustasoilla 1:1.5, 1:3 ja 1:6 ja +S9-testissä lisäksi laimennustasolla 1:12. Tuore lietelanta testattiin molemmissa testeissä laimennustasoilla (1:1.5, 1:3, 1:6 ja 1:12). Mittaus suoritettiin spektrofotometrillä (Hitachi U-2000). Testituloksena saadaan sekä solujen kasvukertoimet, joiden perusteella nähdään, onko testattava näyte solutoksinen vai ei, että β -G-daasin aktiivisuus ilmaistuna induktiosuhteena (I), joka ylittäessään 1,5 kertoo näytteen olevan genotoksinen eli perimämyrkyllinen.

Taulukko 18. Näytteiden punnistustiedot UMU-testissä sekä DMSO-liuoksen väri.

Näyte	Näytemäärä uutossa (g, tuorepaino)	Näytemäärä uutossa (g, kuivapaino)	30 % DMSO-uutteen väri
Metsäpirtti (kylmäkuivattu)	10,0	10,0	Kellertävä
Metsäpirtti (tuore)	10,1	3,1	Rusehtava
Kemicond (kylmäkuivattu)	5,5	5,5	Kellertävä
Kemicond (tuore)	10,2	3,2	Kellertävä
HSY mädäte (kylmäkuivattu)	7,6	7,6	Rusehtava
HSY mädäte (tuore)	10,2	3,1	Rusehtava
Pyrolysoitu HSY mädäte	10,1	10,1	Tummempi rusehtava
Lietelanta (kylmäkuivattu)*	3,1	3,1	Rusehtava

*Lietelanta (tuore) sentrifugoitu ja nestettä laimennettu suoraan UMU-testiin ilman ASE-uuttoa.

5.3. Tulokset ja niiden tarkastelu

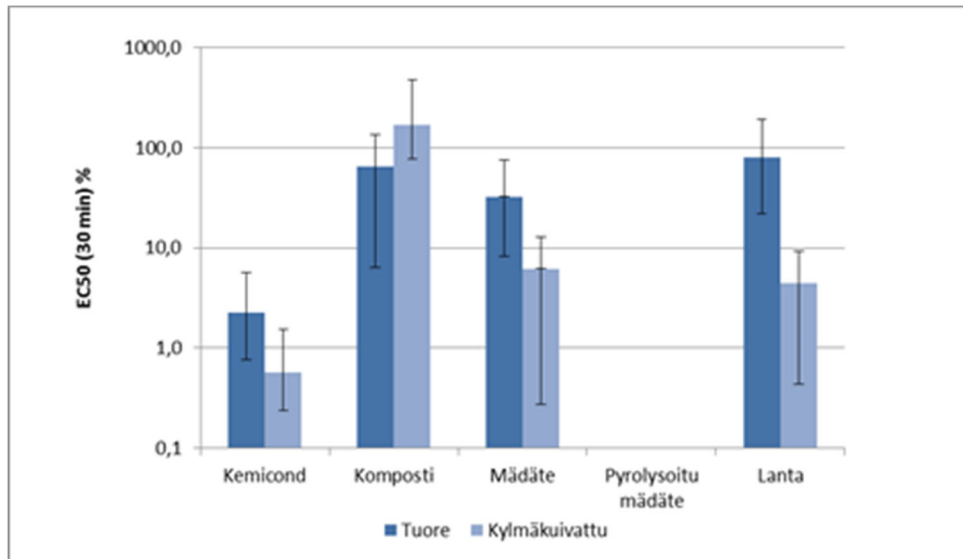
5.3.1. Valobakteeritesti

Akuutti valobakteeritesti kertoo näytteen lyhytkestoisesta ympäristövaarasta. Toksisuustestin antamat 50 % valontuoton inhibitoarvot (EC_{50}) 30 minuutin altistuksen jälkeen on esitetty kuvassa 18 sekä taulukossa 19. Toksisuusarvot on ilmoitettu prosentteina näytettä kohti (vastaa 2 g tuorepainoa), eli mitä pienempi arvo on, sitä vähemmän lietettä on tarvittu aiheuttamaan 50 % valontuoton inhibito bakteereille. Pieni EC_{50} -arvo kuvastaa siis suurempaa toksisuutta.

Näytteen toksisuuteen vaikuttaa mm. testiliuoksessa käytetty näytemäärä, joka taas vaikuttaa testattavan uutteen väriin ja konsentraatioihin. Tuoreesta näytteestä voi liueta mahdollisesti enemmän yhdisteitä samassa ajassa suolaliuokseen kuin kuivatusta näytteestä. Jos uute on erityisen tumma, se voi aiheuttaa ns. väärän positiivisen tuloksen. Valobakteeritestin yhteydessä on täten monta mahdollista tekijää, jotka on otettava huomioon tuloksia tulkittaessa.

Kineettisen valobakteeritestin perusteella kemiallisesti käsitelty kuivattu liete (Kemicond) osoittautui toksisimmaksi ja Metsäpirtin komposti vähiten toksiseksi. Kuivattu Kemicond-käsitelty liete aiheutti 50 % toksisuuden alle 1 % näytepitoisuudella. Muita selvästi toksisia tuotteita olivat kuivattu naudan lietelanta, kuivattu HSY mädäte sekä Kemicond-käsitelty tuore liete, joilla molemmilla alle 10 % näytepitoisuus aiheutti 50 % valontuoton inhibition eli toksisen vasteen valobakteereilla.

Tässä tutkimuksessa kemiallisesti käsitellyn Kemicond-tuotteen havaittiin aiheuttavan valontuoton inhibitiota sekä tuoreena että kuivatuna. Myös kuivattu HSY:n mädäte oli valobakteerille akuutisti toksinen. Pyrolysoitu mädäte ei ollut akuutisti toksinen valobakteerille. Pyrolyysissä kuitenkin havaittiin muodostuvan PAH-yhdisteitä, joiden on todettu olevan toksisia valobakteereille, mutta jotka eivät liukene tuotteesta uutossa käytettyyn natriumkloridiliuokseen. Kemicond-uutteiden selvä toksinen vaste antaa tämän tutkimuksen perusteella aiheen lisätesteille varsinaisen ympäristöriskin selvittämiseksi.



Kuva 18. Lietetuotteiden ja lannan valontuoton inhibitioarvot (EC50) 30 min altistuksella. Testiin punnittiin 2 g tuotetta näytettä.

5.3.2. UMU-testi

Taulukossa 19 on koottuna näytteiden induktiosuhteet ja keskihajonnat laimennustasojen mukaan molemmilla testeillä. Näytteen tulkitaan olevan genotoksinen, kun induktiosuhde > 1,50. Tuloksista nähdään monen näytteen olleen solumyrkyllinen testiorganismille (merkitty taulukkoon 19 viivalla, koska induktiosuhdetta ei ole voitu määrittää). Näitä induktiosuhteita ei voi siis käyttää genotoksisuuden tulkintaan, sillä solumyrkyllisyys haittaa testin toimintaa. Solumyrkyllisiä ovat -S9-testissä kylmäkuivatut HSY määdäte suurimmassa testipitoisuudessa (laimennustaso 1:1,5) ja lietalanta laimennustasoilla 1:1,5 ja 1:3 (taulukko 19). Kylmäkuivattu lietalanta on myös samoissa laimennustasoissa solumyrkyllinen +S9-testissä, mutta genotoksisuutta ei tullut esiin muissa laimennustasoissa (taulukko 19). Tuore Metsäpirtti oli solumyrkyllinen laimennustasoilla 1:1,5 ja 1:3 -S9-testissä ja laimennustasolla 1:1,5 +S9-testissä. Solumyrkyllisiä olivat myös pyrolysoitu HSY laimennustasolla 1:1,5 ja tuore näytteistä Metsäpirtti laimennustasoilla 1:1,5 ja 1:3 -S9-testissä sekä +S9-testissä laimennustasolla 1:1,5 (taulukko 19).

Genotoksisia näytteitä olivat -S9-testissä kylmäkuivattu (laimennustaso 1:1,5 ja 1:3) ja tuore Metsäpirtti (laimennustaso 1:6), tuore HSY määdäte laimennustasolla 1:6. Tuore lietalanta oli genotoksinen laimennustasolla 1:1,5. Metabolisen aktivoinnin jälkeen +S9-testissä genotoksisia olivat tuore Metsäpirtti kaikissa tutkituissa laimennustasoissa, HSY määdäte laimennustasoilla 1:1,5 ja 1:3 sekä lietalanta laimennustasolla 1:1,5 (taulukko 19).

UMU-testin tulosten perusteella seuraavat näytteet ovat olleet genotoksisia (taulukko 19):

- Metsäpirtin kylmäkuivattu näyte -S9-testissä laimennustasot 1:1,5 ja 1:3
- Metsäpirtin tuorepakastettu näyte -S9-testissä laimennustaso 1:3 ja +S9-testissä laimennustasot 1:3, 1:6 ja 1:12
- tuorepakastettu HSY-määdäte -S9-testissä laimennustasot 1:3 ja 1:6 ja +S9-testissä laimennustasot 1:1,5 ja 1:3
- tuore naudan lietalanta -S9-testissä laimennustaso 1:1,5 ja +S9-testissä laimennustaso 1:1,5

Taulukko 19. Genotoksisuustestin tulokset. Tulosta ei ole ilmoitettu näytteille, joissa kasvukerroin $< 0,5$ (solutoksinen näyte). Jos tulos eli induktiosuhde on yli 1,50, näyte on genotoksinen ja merkitty taulukkoon punaisella.

Näyte/laimennustaso	-S-testi				+S9-testi			
	1:1,5	1:3	1:6	1:12	1:1,5	1:3	1:6	1:12
Metsäpirtti (kylmäkuivattu)	2,30	1,82	1,46		0,96	0,93	0,86	0,95
Kemicond (kylmäkuivattu)	1,31	1,23	1,06		0,69	0,91	0,85	1,19
HSY mädäte (kylmäkuivattu)	-	1,38	1,17		0,80	1,03	0,87	1,21
Pyrolysoitu HSY-mädäte (kuiva)	-	1,37	1,09		1,13	1,06	1,04	1,23
Lietelanta (kylmäkuivattu)	-	-	-		-	-	1,26	1,36
Metsäpirtti (tuore)	-	-	6,41		-	5,66	3,11	1,80
Kemicond (tuore)	1,00	1,16	0,98		1,04	0,89	0,94	1,15
HSY mädäte (tuore)	-	6,28	2,32		2,32	1,66	1,20	1,15
Lietelanta (tuore, pakastettu, fuugattu)	1,88	1,11	1,03	1,12	1,53	1,06	1,11	1,24

Kylmäkuivattu Kemicond, kylmäkuivattu HSY mädäte, pyrolysoitu HSY-mädäte, kylmäkuivattu lietelanta sekä tuorepakastettu Kemicond eivät puolestaan olleet genotoksisia millään tutkitulla pitoisuudella. Koska testi perustuu näyteuutteiden absorbanssiin aallonpituuksilla 450 ja 620 nm, myös uutteessa olevilla värisillä, testin aallonpituuksilla absorboivilla yhdisteillä voi olla suuri vaikutus testin tuloksiin. Toisaalta uutteista tummin, eli pyrolyysituote, ei ollut testin mukaan toksinen, joten uutteen väri ei yksistään selitä toksisuutta. Mittaustulosten perusteella värin vaikutus oli todennäköisesti suuri erityisesti tuoreiden näytteiden uutteissa, sillä ne olivat pääsääntöisesti sekä solu- että perimämyrkyllisempiä kuin kuivatuista näytteistä tehty uutteet. On todennäköistä, että tuoreissa näytteissä ollut vesi edesauttoi esimerkiksi vesiliukoisten, testin aallonpituusalueella absorboivien humushappojen uuttumista näytteistä, mutta kuivasta näytteestä ne eivät uuttuneet yhtä tehokkaasti heksaaniin ja dikloorimetaaniin. Esimerkiksi Metsäpirtin komposti sisältää turvetta, jossa humushappoja on paljon. Tuorepakastetun näytteen uute oli väriltään selvästi tummempi kuin kylmäkuivatusta kompostista saatu uute (Taulukko 18), ja UMU-testin mukaan tuorepakastetun uute oli myös selvästi toksisempi (Taulukko 19). Siten on mahdollista, että kuivatuista näytteistä tehtyjen uutteen solu- ja perimämyrkyllisyys kuvaavat paremmin todellista toksisuutta, vaikka myös niillä uutteen väri voi aiheuttaa toksisuuden yliarvioinnin.

Toisaalta myös tietyt genotoksiset ja vesiliukoiset yhdisteet ovat voineet uuttua paremmin tuoreista näytteistä. Koska lietenäytteistä ei ole mitattu kaikkia mahdollisia vierasaineita, on vaikea sanoa mitkä toksiset komponentit voisivat aiheuttaa solu- ja genotoksisuutta. Aiempien tutkimusten perusteella on esimerkiksi havaittu, että jäteveden sisältämät antibiootit ja erityisesti siprofloksasiini aiheuttivat valtaosan UMU-testin -S9 genotoksisuudesta (Hartmann ym. 2009). On mahdollista, että tuoreiden näytteiden sisältämä vesi on edesauttanut näiden hyvin vesiliukoisten yhdisteiden uuttumista näytteestä, kun taas heksaaniin tai dikloorimetaaniin ne eivät liukene, jolloin kylmäkuivatuissa näytteistä ne todennäköisesti puuttuvat. Tämä voisi selittää osin sitä, miksi tuoreet näytteet olivat genotoksisempia kuin kylmäkuivatut näytteet. Tämä voisi myös selittää lannan aiheuttaman genotoksisuuden, sillä lannassa on voinut olla genotoksisuutta aiheuttavia, myös eläinten lääkinnässä käytettäviä antibiootteja.

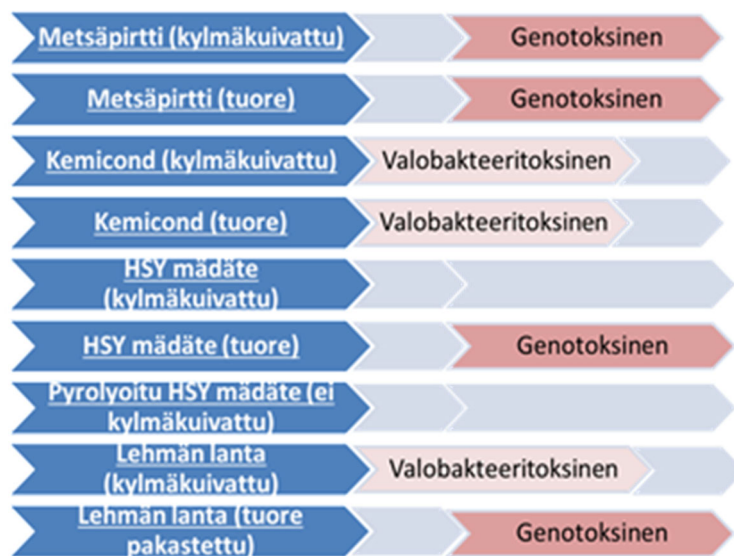
5.3.3. Käytettyjen testimenetelmien arviointi ja soveltuvuus lietetuotteille

Yhdyskuntalietteiden ympäristöriskiä on perinteisesti tarkasteltu yksittäisten yhdisteiden toksisuuden kautta. On kuitenkin huomattava, että lietteet ja lietetuotteet sisältävät monia yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa erilaisia haitallisia vaikutuksia ja sen vuoksi lietteiden ympäristöriskiä olisi hyvä tarkas-

tella kokonaistoksisuuden kautta. Eri eliöillä suoritettujen toksisuustestien tulokset kertovat tutkitun näytteen ympäristöhaitasta vain sille eliölle ja testissä käytetyissä olosuhteissa. Lisäksi näytteen matriisi ja luonne voivat vaikuttaa testin tuloksiin häiritsevästi. Uusimmissa lietetuotteiden riskinarvioinneissa (McCarthy ym. 2015) todetaan, että vaikka riskiosamäärien laskeminen onkin tyypillinen tapa arvioida tuotteiden ympäristöriskiä, maaperätoksisuusdatan puuttumisen vuoksi riskinarviot eivät välttämättä kerro paljonkaan maaperään kohdistuvasta riskistä. Riskiarvioinnissa olisi myös tunnistettava ja huomioitava tutkimustiedon puutteet (Burton ym. 2012).

Tässä hankkeessa tehdyissä toksisuustesteissä tarkastelluista materiaaleista valmistettiin uutteen, joita käytettiin laimennossarjojen tekemiseen. Mahdollisesti toksisuutta aiheuttavat yhdisteet eivät liukene yhtäläisesti erilaisiin uuttoluoksiin. UMU- ja valobakteeritesteissä käytettiin eri uuttoluoksia, ja tästä syystä testeissä tarkasteltujen uutteen haitta-ainekoostumukset eivät todennäköisesti ole samanlaiset. Lisäksi orgaanisilla uuttoluoksilla (heksaani, dikloorimetaani) tuotettu uute ei välttämättä kuvaa maaperässä välittömästi biosaatavaa, vesiliukoista haitta-aineosuutta. Testien tuloksia tulkittaessa on siis otettava huomioon, että tulokset kuvaavat kulloinkin tarkasteltujen uutteen toksisuutta. Toksisuustestien yhteenveto on esitetty kuvassa 19.

Tulosten tulkinnassa on huomioitava myös se, että toksisuustestien tulokset kertovat itse tuotteen haitallisuudesta. Lietevalmisteiden vaikutus maaperään riippuu sen haitta-ainekoostumuksesta, haitallisten aineiden hajoamisnopeudesta, ympäristöolosuhteista ja biosaatavuudesta. Tämän vuoksi lietetuotteiden haitallisuutta ympäristölle tulisi tutkia ympäristössä havaituilla pitoisuuksilla sekä niillä eliölajeilla, jotka elävät ko. matriiseissa, eli maaperätoksisuuden ollessa kyseessä lieroilla ja muilla maaperäeliöillä sekä kasveilla tehtävällä itävyystestillä. Nämä testit ovat kuitenkin usein kalliita ja aikaa vieviä ja siksi tässä hankkeessa keskityttiin tutkimaan ympäristöriskiä nopeammilla ja edullisemmilla, tilannetta alustavasti kartoittavilla testimenetelmillä.



Kuva 19. Lietetuotteiden havaittu toksisuus.

6. Ympäristöriskinarviointi

6.1. Aineisto ja menetelmät

Hankkeessa toteutettiin laskennallinen riskinarviointi lietevalmisteiden käytön aiheuttamalle maaperäriskille. Tarkastelu toteutettiin kuvassa 20 esitettyä riskinarvioinnin käsitteellistä mallia mukaillen. Laskennassa arvioitiin maaperän haitta-ainepitoisuuksia eri ajankohtina ja verrattiin näitä pitoisuuksia kirjallisuudessa ilmoitettuihin PNEC-arvoihin (PNEC, predicted no effect concentration). Ympäristön ominaisuuksia kuvaavien muuttujien arvoiksi valittiin tavanomaiset arvot, eikä todellisessa ympäristössä esiintyvää vaihtelua huomioitu muuten kuin laskennalle tehdyllä herkkyystarkastelulla. Tarkastelu toteutettiin yleisesti käytetyillä yhtälöillä. Laskentatapaa ei tämän hankkeen puitteissa valittu mittausaineistolla, mutta laskentatuloksia verrattiin aiemmin julkaistuun pitoisuusaineistoon niiltä osin kuin sellaista oli saatavilla.

Laskennallisessa tarkastelussa arvioitiin maaperän haitta-aineiden pitoisuustasoja eri aikajännteillä lietelevitysten jälkeen. Pitoisuuksia arvioitiin kahdella erilaisella levitysskenaariolla (lietelevitys $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ 5v}^{-1}$; $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$). Pitoisuusvertailussa käytetyt PNEC-arvot pyrittiin valitsemaan kirjallisuudesta kriittisesti, mutta PNEC-arvojen johtamismenettelyn tarkempi arviointi ei sisällynyt hankkeeseen.

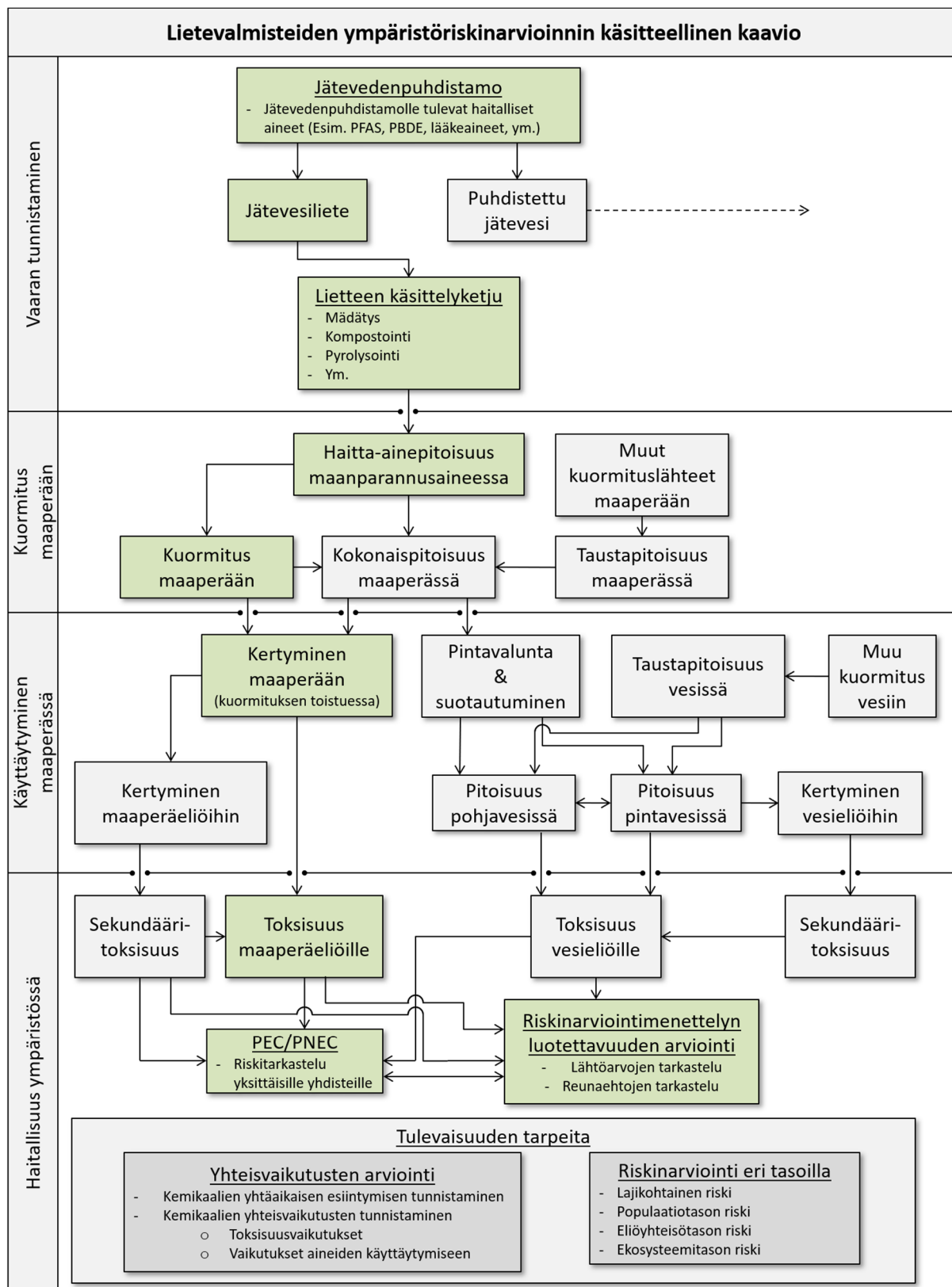
Levitettävän lietevalmisteen pitoisuusaineistona käytettiin tässä hankkeessa tuotettua pitoisuusaineistoa. Tämän pitoisuusaineiston rajallisuus voisi kuitenkin johtaa siihen, että riskiä ei havaittaisi joillekin mahdollisesti riskiä aiheuttaville aineille. Tarkastelun luotettavuuden parantamiseksi ja aineiden priorisoinnin mahdollistamiseksi, laskenta toteutettiin hyödyntäen lisäksi laajaa Ruotsissa tuotettua pitoisuusaineistoa.

Tarkastelussa keskityttiin maaperässä odotettaviin ekotoksisiin vaikutuksiin, eikä sen perusteella voi tehdä päätelmiä esim. huuhtouman aiheuttamasta kuormasta pinta- tai pohjavesiin tai sen aiheuttamista vaikutuksista. Laskennassa ei huomioitu muista lähteistä maaperään tulevaa haitta-ainekuormitusta tai mahdollista taustapitoisuutta.

6.2. Laskennan toteutus

Haitta-aineen pitoisuus maaperässä laskettiin kullekin ajanhetkelle ottaen huomioon muutokset ainemäärässä haitta-aineen hajoamisen ja suotautumisen aiheuttaman vähenemisen ja lietelevityksen toistumisen tuoman lisäkuormituksen seurauksena. Haitta-ainepitoisuudet arvioitiin käyttäen EU:n riskinarviointiohjeen (EC 2003) mukaisia yhtälöitä. Laskennassa käytetyt yhtälöt on esitetty liitteessä 43.

Laskennassa pyrittiin huomioimaan ero haitta-aineiden hajoamisajassa laboratorio-olosuhteiden ja Suomen kenttäolosuhteiden välillä. Tämä toteutettiin Arrheniuksen yhtälöllä kasvinsuojeluaineille sovellettavien käytäntöjen mukaisesti (esim. Mattsoff 2005) (Liite 43, yhtälöt 3 & 4). Huuhtoutumisen vaikutusta aineen poistumiseen muokkauskerroksesta tarkasteltiin EU:n riskinarviointiohjeiden mukaisella yhtälöllä (Liite 43, yhtälö 5) ja oletuksilla. Tarkastelluille yhdisteille kirjallisuudessa ilmoitettujen jakautumiskertoimien perusteella huuhtoutuminen ei ole merkittävä poistumistapa maaperästä. Huuhtoutumistarkastelu sisällytettiin lopulta vain PFAA-yhdisteille tehtyyn tarkasteluun, koska voidaan olettaa, että kyseiset yhdisteet eivät hajoa maaperässä, vaan ensisijainen poistumisreitti on pintavalunta ja suotautuminen syvemmälle maaperään.

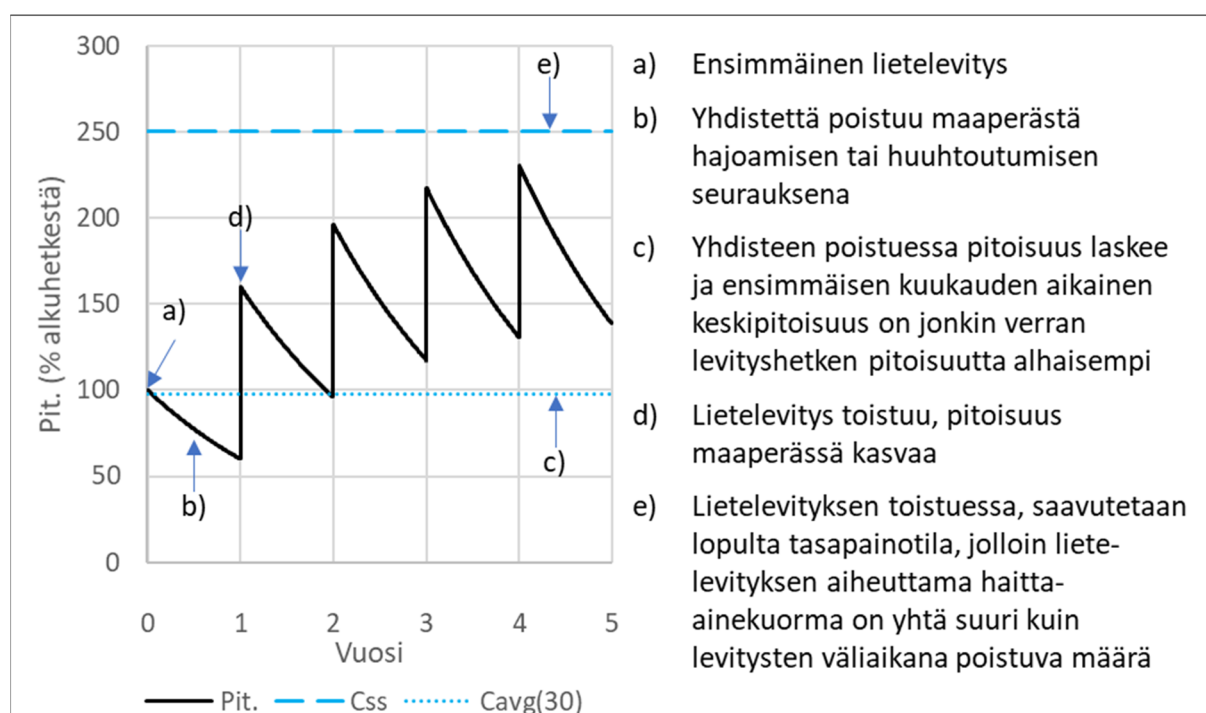


Kuva 20. PProduct-hankkeessa mukailtu käsitteellinen malli. Tarkastelussa huomioitiin vihreällä merkityt solut.

Laskennalla johdettiin kolme erilaista pitoisuustasoa (ks. Taulukko 20 ja Kuva 21). Riskitasoja arvioitiin vertaamalla näitä pitoisuustasoja PNEC-tasoon.

Taulukko 20. Laskennalla johdetut pitoisuustasot.

Pitoisuustaso	Selite
$C_{soil}(0)$	Haitta-aineen pitoisuus maaperässä 1. levityshetkellä
$C_{avg}(30)$	Haitta-aineen keskipitoisuus 1. levitystä seuraavan 30 vrk aikana
C_{ss}	Haitta-aineen pitoisuus tasapainotilanteessa levityshetkellä (Tasapaino on ajanhetki, jolloin poistuminen lietelevitysten välisenä aikana = lietelevityksestä aiheutuva haitta-ainekuorma)
C_{HV}	Haitta-aineen pitoisuus, jota korkeampien pitoisuuksien voidaan olettaa johtavan PNEC-tason ylitykseen maaperässä



Kuva 21. Haitta-aineen laskennallisen pitoisuuden kehittyminen lietelevitystä seuraavana aikana.

Vertaamalla C_{ss} -arvoa PNEC-tasoon johdettiin kullekin yhdistelle riskiosamäärä (RQ) liitteessä 43 olevan **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt.** yhtälön 12 mukaisesti. Riskiosamäärää voidaan tulkita suunta-antavasti taulukon 21 mukaisesti. RQ-arvon tulkinassa on kuitenkin huomioitava, että RQ-arvo 1 on jo signaali riskistä. Koska tarkastelussa käytetyt PNEC-arvot perustuvat toksisuustesteihin, joissa aiheutettujen vaikutusten vakavuus (testieliöiden kuolema, kasvun hidastuminen, ym.) vaihtelee, eivät RQ-arvot ole ongelmattomasti vertailtavissa keskenään.

Taulukko 21. Riskiosamäärän tulkinta.

RQ	Selite
$\leq 0,1$	Merkityksettömän alhainen riski
0,1–1	Alhainen riski
1–10	Kohtalainen riski
> 10	Korkea riski

Niille aineille, joille riskiosamäärä (Liite 43, yhtälö 12) on suurempi kuin 0,1, johdettiin liitteen 43 yhtälöllä 13 pitoisuustasot (C_{HV}), joita korkeammat haitta-aineiden pitoisuudet lietevalmisteissa johtaisivat PNEC-tason ylittymiseen maaperässä. Tällaisessa tapauksessa yhdisteen voidaan olettaa aiheuttavan haittaa maaperässä.

6.3. Laskennan lähtöarvot

Tarkastelusysteemin reunaehtoina käytettiin soveltuvilta osin EU:n riskinarviointiohjeistuksen (EC 2003) mukaisia lähtötietoja. Lietteen levitysmääräksi Suomessa on aikaisemmin arvioitu n. $5,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$ (Äystö 2014). Tämä arvo perustuu lainsäädännössä asetettuun typpilisäyksen enimmäismäärään (VNa 1250/2014, 11§). Tässä työssä lietteen levitysmääränä käytettiin kahta arvoa, $5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$ ja $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$.

Aineiden käyttäytyminen ympäristössä vaihtelee vallitsevien olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi hajoamisnopeus riippuu valo-olosuhteista, lämpötilasta ja maaperän biologisesta aktiivisuudesta (Bu ym. 2016). Pidättyminen maaperään riippuu esimerkiksi maaperän happamuudesta, mineraalikoostumuksesta sekä orgaanisen aineen määrästä. Ympäristön olosuhteita kuvaavat lähtöarvot pyrittiin valitsemaan siten, että ne kuvaavat tavanomaista tilannetta Suomessa. Puoliintumisaikojen lämpötilakorjauksissa käytettiin kasvinsuojeluaineille kehitetyn PECsoil-laskurin (Matssoff 2005) mukaista keskilämpötilaa $5,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Ympäristöolosuhteita kuvaavat lähtöarvot on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Ympäristöriskinarvioinnin laskennassa käytettyjä lähtöarvoja.

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
Haitta-aineen pitoisuus levitettävässä materiaalissa, C_{sludge}	Riippuu haitta-aineesta ja liettemateriaalista	mg kg^{-1}
Levitettävän lietteen mas, M_{sludge}	Käytetty arvoja 5 000 ja 20 000	$\text{kg ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$
Muokkauskerroksen paksuus, D_{soil}	0,2	m
Maaperän ominaispaino, ρ_{soil}	1,2	kg l^{-1}
Haitta-aineen puoliintumisaika maaperässä, DT_{50}	Riippuu tarkasteltavasta haitta-aineesta	vrk
Aktivoitumisenergia, E_A	65,4	kJ mol^{-1}
Kaasuvakio, R	8,31446	$\text{J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Ympäristössä toteutuva keskilämpötila, T_{avg}	5,3	$^{\circ}\text{C}$
Hajoamiskokeen referenssilämpötila, T_{ref}	Riippuu puoliintumisajan määrittämisestä koetestelmasta	$^{\circ}\text{C}$
Sadannasta maaperään imeytyvä osuus, f_{infil}	25	%
Sadanta, $RAIN_{rate}$	700	mm v^{-1}
Maa-vesi -jakautumiskerroin, k_d ja Orgaaniseen hiileen normalisoitu jakautumiskerroin, k_{oc}	Riippuu haitta-aineesta	l kg^{-1}
Lieteleivytysten välinen aika, t_{int}	Käytetty arvoja 1 ja 5	v

Taulukon 5 yhdisteistä tarkasteltaviksi valikoituivat ne, joille oli saatavilla tarvittavat yhdistekohtaiset lähtötiedot. Yhdistekohtaisia ominaisuuksia kuvaavat lähtöarvot pyrittiin valitsemaan kriittisesti mutta konservatiivisesti, jotta riskiä ei aliarvioitaisi. Aineisto kerättiin aikaisemmista lietteiden hyötykäyttöä koskeneista riskinarviointiraporteista, tieteellisistä artikkeleista sekä muista kirjallisista lähteistä. Haitta-aineiden pitoisuutena lietevalmisteissa käytettiin tässä hankkeessa tuotettua aineistoa sekä

ruotsalaista aineistoa, joka haettiin ruotsin ympäristökartoitusaineistoa sisältävästä tietokannasta (IVL & Naturvårdsverket 2017). Yhdistekohtaiset lähtöarvot on esitetty liitteessä 40.

PNEC-aineistona pyrittiin käyttämään pääsääntöisesti maaperätesteillä tuotettua tietoa. Koska tällaista aineistoa on saatavilla hyvin harvoille yhdisteille, jouduttiin PNEC-arvot johtamaan useimmille aineille vesieliöillä tuotetusta toksisuusaineistosta tasapainojakautumismenetelmällä (EqP, equilibrium partitioning method) (Liite 43, yhtälö 11). EqP on yleisesti käytetty tapa arvioida haitatonta pitoisuutta esim. maaperässä tai sedimentissä käyttäen hyödyksi vesieliöillä tuotettua toksisuusaineistoa sekä tietoa yhdisteen jakautumiskäyttäytymisestä tarkasteltavassa ympäristön osassa. Tasapainojakautumismenetelmän taustaoletus on, että toksisuus aiheutuu maan huokosveteen liuenneesta haitta-aineesta. Mitä suurempi aineen jakautumiskerroin on, sitä tehokkaammin se pidättyy maaperän kiintoaineeseen, ja sitä alhaisempi aineen pitoisuus on huokosvedessä. Korkean jakautumiskertoimen yhdisteitä ovat tässä hankkeessa tarkastelluista esimerkiksi PBDE-yhdisteet. Menetelmä voi johtaa riskien aliarviointiin esim. silloin, jos haitta-aine on pidättynyt kiintoaineeseen ja tätä maa-ainesta päätyy eliöiden ruuansulatukseen. EU:n riskinarviointiohjeistus suosittelee mm., että EqP-menetelmällä arvioituja PNEC-arvoja käytettäessä, riskiosamäärän ylittäessä arvon 1, tulisi ko. aineille tuottaa toksisuusaineistoa maaperäeliöillä (EC 2003).

6.4. Tulokset ja tulosten tarkastelu

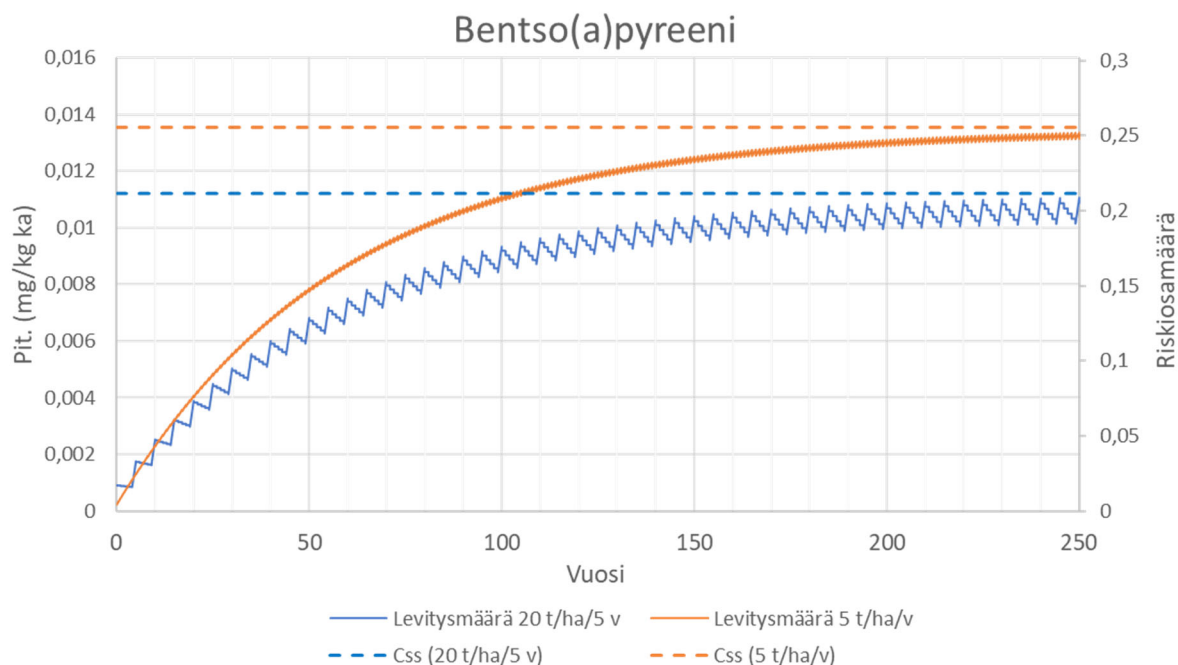
6.4.1. PAH yhdisteet

Laskennan arvioidut maaperäpitoisuudet 15 PAH-yhdisteelle on esitetty taulukossa 23. Laskennan mukaan BBF on tarkastelluista PAH-yhdisteistä erityisen altis kertymään maaperään lietelevitysten toistuessa. Yhdisteen tasapainopitoisuuden arvioitiin vuosittaisilla 5 t ha^{-1} lietelevityksillä olevan n. 64-kertainen suhteessa välittömästi ensimmäisen lietelevityksen jälkeen vallitsevaan pitoisuuteen. Vastaavasti heikommin kertyviksi yhdisteiksi tunnistettiin ANY ja FLUR.

Taulukko 23. PAH-yhdisteiden laskennallisia pitoisuuksia maaperässä eri ajanhetkinä ja erilaisilla levitysmäärillä ja yhdistekohtaista kertymispotentiaalia kuvaava F_{acc-ss} -arvo (ks. Lyhenteet Liite 43 ja Taulukko 5).

Yhdiste	$C_{soil}(0) [\mu\text{g kg}^{-1}]$		$C_{avg}(30) [\mu\text{g kg}^{-1}]$		$C_{ss} [\mu\text{g kg}^{-1}]$		$F_{acc-ss} [\%]$	
	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$
ANTR	0,18	0,7	0,17	0,7	10	8,3	5600	1100
ANP	0,18	0,73	0,18	0,72	0,47	0,8	150	8,9
ANY	0,025	0,1	0,024	0,097	0,044	0,1	74	1,4
BAA	0,27	1,1	0,27	1,1	3,7	3,5	1300	220
BAP	0,23	0,92	0,23	0,92	14	11	5800	1100
BBF	0,52	2,1	0,52	2,1	34	28	6400	1200
BGHI	0,69	2,8	0,69	2,7	43	36	6200	1200
BKF	0,16	0,64	0,16	0,64	10	8,3	6200	1200
DBAH	0,054	0,22	0,054	0,22	1	0,91	1800	320
PHN	1,1	4,3	1,1	4,2	4,7	5,9	340	39
FLUO	1,4	5,6	1,4	5,6	13	13	810	130
FLUR	0,27	1,1	0,26	1	0,47	1,1	74	1,4
IP	0,6	2,4	0,6	2,4	8,9	8,2	1400	240
CHRY	0,25	1	0,25	1	5	4,4	1900	340
NAFT	0,17	0,68	0,17	0,68	2,6	2,4	1500	250

Lietelelevitysten tiheydellä oli suuri vaikutus yhdisteiden kertymiseen. PAH-yhdisteistä korkeimman riskiosamäärän (0,26) tasapainotilassa saavutti BAP (Kuva 22, Taulukko 24). Tässä hankkeessa analysoituja näytteistä havaituilla pitoisuuksilla myös BGHI ja BBF ylittivät tasapainotilassa RQ-tason 0,1 (Taulukko 24). Laajempaa ruotsalaista pitoisuusaineistoa laskennassa käytettäessä myös BAA ja BKF ylittivät tämän RQ-tason. Alhaisimman riskin aineiksi tarkastelussa osoittautuivat ANY ja FLUR.



Kuva 22. Bentso(a)pyreenin kertyminen maaperään lietelevitysten toistuessa kahdella eri levitystiheydellä ja -määrällä.

Taulukko 24. PAH-yhdisteille lasketut RQ- ja C_{HV} -arvot. Riskiosamäärät on värikoodattu taulukon 12 mukaisesti. Vertailuarvona esitetty riskiosamäärä laskettuna Ruotsissa havaitulla pitoisuudella (IVL & Naturvårdsverket 2017).

Yhdiste	RQ				C _{HV} (mg/kg)		PProduct- tulosten vaih- teluväli (mg kg ⁻¹)
	PProduct-max		Ruotsi 95 %				
	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	
BAP	0,26	0,21	0,79	0,65	0,43	0,52	0,011–0,11
BGHI	0,25	0,21	0,61	0,51	1,3	1,6	<0,01–0,33
BBF	0,12	0,099	0,22	0,18	2,1	2,5	0,072–0,25
ANTR	0,077	0,064	0,081	0,067			
BAA	0,047	0,044	0,14	0,13	2,7	3	0,025–0,13
BKF	0,037	0,031	0,12	0,099	2,1	2,5	<0,01–0,077
IP	0,024	0,022	0,038	0,035			
ANP	0,012	0,021	0,0075	0,013			
CHRY	0,0091	0,0081	0,045	0,039			
FLUO	0,0085	0,0085	0,012	0,012			
DBAH	0,0057	0,0051	0,029	0,026			
NAFT	0,0038	0,0035	0,0046	0,0042			
PHN	0,0026	0,0033	0,0037	0,0046			
FLUR	0,00047	0,0011	0,00046	0,0011			
ANY	0,00026	0,00060	0,0088	0,020			

6.4.2. PFAA-yhdisteet

PFAA-yhdisteiden maaperäpitoisuuksien arvioinnissa ainoaksi poistumisreitiksi oletettiin huuhtoutuminen pintavaluntana sekä syvemälle maaperään. Korkeimman laskennallisen pitoisuustason saavutti PFDA. Yhdisteen kertyvyys maaperään oli myös tarkastelluista PFAA-yhdisteistä suurinta. PFAA-yhdisteet ovat hyvin pysyviä maaperässä ja poistuessaankin niiden voidaan olettaa ensisijaisesti kulkeutuvan vesien mukana, eikä poistuvan pysyvästi kierrosta. PFAA-yhdisteille laskettuja pitoisuustasoja on esitetty taulukossa 25.

Taulukko 25. PFAA-yhdisteiden laskennallisia pitoisuuksia maaperässä eri ajanhetkinä ja erilaisilla levitysmäärillä ja yhdistekotaista kertymispotentiaalia kuvaava F_{acc-ss} -arvo. (ks. Lyhenteet liite 43 ja Taulukko 5).

Yhdiste	$C_{soil}(0)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		$C_{avg}(30)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		C_{ss} [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		F_{acc-ss} [%]	
	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$
PFOS	0,011	0,042	0,011	0,042	0,18	0,16	1600	280
PFDA	0,010	0,041	0,010	0,041	0,93	0,76	9000	1800
PFOA	0,019	0,077	0,019	0,075	0,052	0,085	170	11
PFNA	0,0027	0,011	0,0026	0,011	0,017	0,018	530	72

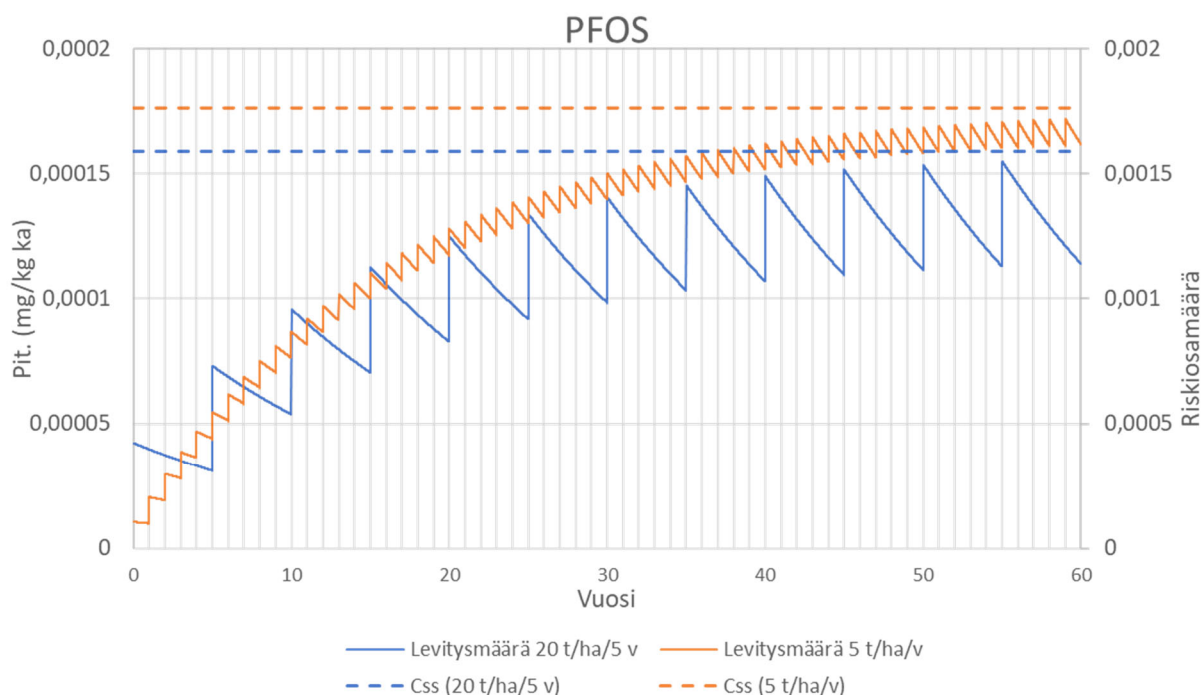
Suomessa PFAA-yhdisteiden pitoisuuksia on kartoitettu maaperässä vain vähän. RUSSOA-hankkeessa määritettiin pitoisuuksia maaperässä kahdelta alueelta, joille oli levitetty lietevalmisteita sekä referenssialueelta (Fjäder 2016). PFOS:n pitoisuudet maaperässä sellaisilla alueilla, joille oli levitetty lietevalmisteita, vaihtelivat välillä $1,4\text{--}1,9 \mu\text{g kg}^{-1}$ ja PFDA:n vastaavasti välillä $1,6\text{--}1,7 \mu\text{g kg}^{-1}$. Ruotsissa on kartoitettu PFOS:n pitoisuutta maatalousmailta, joille on levitetty pitkään lietevalmisteita. Havaitut pitoisuudet ovat vaihdelleet välillä $2\text{--}5,1 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Österås ym. 2015). PFAA-yhdisteitä tiedetään esiintyvän maaperässä myös paloharjoitusalueilla. Suomessa PFAA-yhdisteiden esiintyvyyttä paloharjoitusalueilla on kartoitettu PFARA-hankkeessa (Reinikainen ym. 2019).

Maatalousmailta havaittuihin pitoisuuksiin nähden laskennallisesti arvioidut PFOS-pitoisuudet ovat alhaisia. Tämä voi johtua osaksi tässä hankkeessa analysoitujen näytteiden alhaisista PFOS-pitoisuuksista. Korkein lietevalmisteesta havaittu PFOS-pitoisuus oli $5,1 \mu\text{g kg}^{-1}$, kun Ruotsissa lieteistä havaitut pitoisuudet ovat olleet n. 10-kertaisia (Liite 40). Suomessa aiemmin vuonna 2010 havaittu PFOS-pitoisuus lietteissä oli $16\text{--}110 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Huhtala ym. 2011). PFOS:n ja sen johdannaisen käyttö kiellettiin tietyin poikkeuksin EU:ssa vuonna 2009, mikä selittää pitoisuuksien pienenemistä.

PFAA-yhdisteille lasketut riskiosamäärät ovat pääsääntöisesti hyvin pieniä (Taulukko 26). Suurimman riskiosamäärän saavutti PFOS (Kuva 23). Kirjallisuudessa ilmoitettua PNEC_{maa} -arvoa $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ (Amundsen ym. 2008) käyttäen PFOS saavutti RQ-arvon 0,0018. Jos PNEC_{maa} johdettaisiin $\text{PNEC}_{\text{vesi}}$ -arvosta käyttäen liitteessä 40 esitettyjä lähtötietoja, saisi se arvon $0,0072 \text{ mg kg}^{-1}$. Tällöin RQ-arvoksi tulisi vuotuisella levityksellä 0,024.

Taulukko 26. PFAA-yhdisteille lasketut RQ-arvot. Riskiosamäärät on värikoodattu **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt.** mukaisesti. Vertailuarvona esitetty riskiosamäärä laskettuna Ruotsissa havaitulla pitoisuudella (IVL & Naturvårdsverket 2017).

Yhdiste	RQ			
	PProduct-max		Ruotsi 95 %	
	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5\text{v}^{-1}$
PFOS	0,0018	0,0016	0,017	0,015
PFDA	0,0013	0,0010	0,012	0,010
PFOA	0,00033	0,00053	0,00065	0,0011
PFNA	0,000040	0,000044	0,00039	0,00042



Kuva 23. PFOS:n kertyminen maaperään lietelevitysten toistuessa kahdella eri levitystiheydellä ja -määrällä.

Vaikka tässä tarkastelussa PFAA-yhdisteiden riski maaperäympäristölle on tulkittavissa merkityksetömän alhaiseksi, tulee näihin yhdisteisiin suhtautua varovaisuusperiaatteen mukaisesti. Toteutetun kaltainen maaperässä aiheutuviin haittoihin keskittyvä tarkastelu ei ole riittävän kattava kulkeutuville ja pitkäikäisille yhdisteille. Koska PFAA-yhdisteet ovat ympäristössä hajoamattomia, niiden voidaan olettaa poistuvan maatalousmaan muokkauskerroksesta ensisijaisesti huuhtoutumalla. Tällöin ne eivät poistu pysyvästi kierrosta vaan voivat kulkeutua esim. pohja- ja pintavesiin tai kertyä eliöihin.

6.4.3. PBDE-yhdisteet

Laskenta voitiin toteuttaa vain kahdelle PBDE-yhdisteelle, koska muille ei ollut saatavilla tarvittavia ekotoksisuustietoja. Tarkastelu tehtiin BDE-99:lle ja BDE-209:lle, jotka ovat myös aiempien kartoitusten perusteella lietteissä vallitsevia kongeneereja. PBDE-yhdisteiden laskennalliset pitoisuudet on esitetty taulukossa 27.

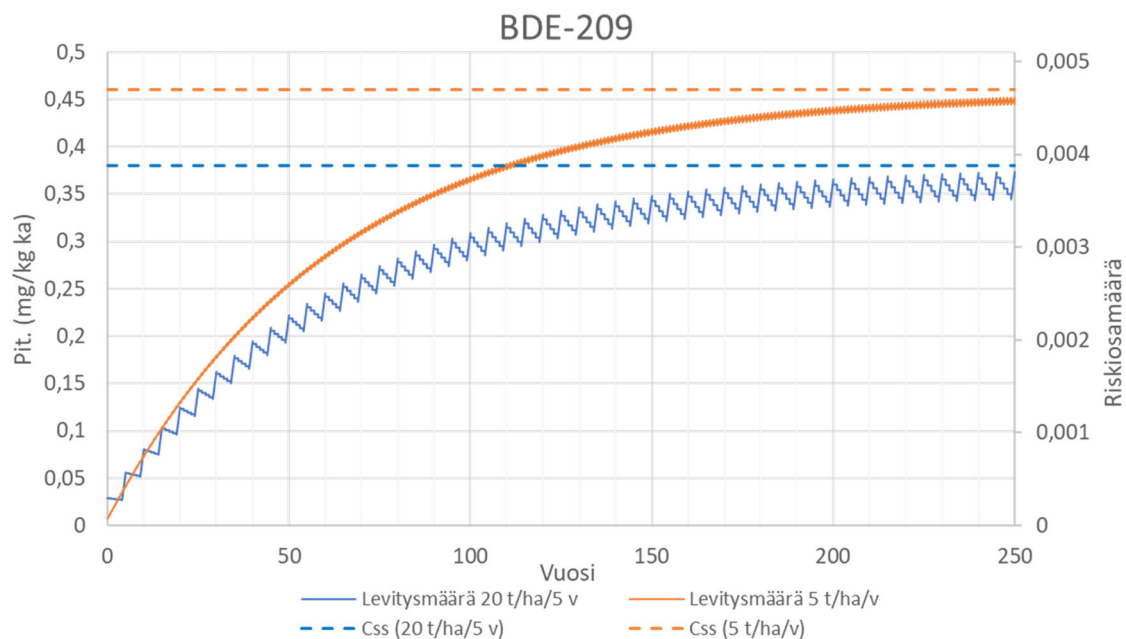
Taulukko 27. PBDE-yhdisteiden laskennallisia pitoisuuksia maaperässä eri ajanhetkinä ja erilaisilla levitysmäärillä ja yhdistekotaista kertymispotentiaalia kuvaava F_{acc-ss} -arvo. (ks. Lyhenteet Liite 43 ja Taulukko 5).

Yhdiste	$C_{soil}(0)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		$C_{avg}(30)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		C_{ss} [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		F_{acc-ss} [%]	
	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$
BDE-99	0,046	0,18	0,046	0,18	0,66	0,6	1300	230
BDE-209	7,3	29	7,3	29	460	380	6200	1200

Suomessa lietteistä mitatut Σ PBDE-pitoisuudet ovat vaihdelleet välillä 179–656 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Huhtala ym. 2011, Fjäder 2016). RUSSOA-hankkeessa referenssipelloilta, jonne yhdyskuntalietetä tuotteita ei ollut levitetty, mitattiin Σ PBDE-pitoisuus 8 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Fjäder 2016). Arktisten alueiden maaperästä mitatut PBDE-pitoisuudet ovat olleet keskimäärin 0,042 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Wang ym. 2015), minkä ajatellaan kuvaavan laskeuman aiheuttamaa taustapitoisuutta maaperässä. RUSSOA-hankkeessa alueilta, jonne yhdyskuntalietevalmisteita oli levitetty, havaitut Σ PBDE-pitoisuudet maaperässä olivat puolestaan melko

korkeita (pellossa $146 \mu\text{g kg}^{-1}$ ja viherrakennusalueella $179 \mu\text{g kg}^{-1}$, Fjäder 2016). Vastaavasti näillä alueilla BDE-99 pitoisuus oli $0,99\text{--}3,5 \mu\text{g kg}^{-1}$ ja BDE-209 pitoisuus $4,7\text{--}160 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Fjäder 2016). Ruotsissa BDE-99:n havaitut pitoisuudet viljelymaan pintakerroksessa toistuvien lietelevitysten jälkeen ovat vaihdelleet välillä $0,1\text{--}0,5 \mu\text{g kg}^{-1}$ ja BDE-209:n välillä $1\text{--}14 \mu\text{g kg}^{-1}$ (Österås ym. 2015).

BDE-99:n laskennallisesti arvioidut pitoisuudet ovat Suomessa havaittujen pitoisuuksien vaihteluvälin alarajalla, mutta hyvin linjassa Ruotsissa havaittujen pitoisuuksien kanssa. Koska BDE-99:n havaitut pitoisuudet ylittävät C_{ss} -tason enimmillään moninkertaisesti, tulisi jatkossa selvittää yhdisteen esiintyvyyttä ja pitoisuustasoa alueellisesti kattavalla kartoituksella. Vastaavasti BDE-209:n pitoisuudet ovat korkeita suhteessa havaittuihin pitoisuuksiin. BDE-209:n pitoisuuden kehitys on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. BDE-209:n kertyminen maaperään lietelevitysten toistuessa kahdella eri levitystiheydellä ja -määrällä.

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu, että lietetuotteiden levitys on PBDE-yhdisteille merkittävin kulkeutumisreitti maaperään (Kasurinen ym. 2014, Marttinen ym. 2014). PBDE-yhdisteiden laskennallisista pitoisuuksista johdetut riskiosamäärät ovat kuitenkin hyvin alhaisia. Riskiosamäärät on esitetty taulukossa 28.

RUSOAH-hankkeessa maaperänäytteestä havaitulla melko korkealla BDE-99-pitoisuudella laskettaessa (Fjäder 2016) riskiosamäärä saisi arvon 0,009. PBDE-yhdisteiden aiheuttamat maaperäriskit ovat tarkastelun perusteella oletettavissa merkityksettömän alhaisiksi. Toteutetunkaltainen tarkastelu ei kuitenkaan ole riittävä näiden yhdisteiden aiheuttamien riskien poissulkemiseksi. PBDE-yhdisteet ovat hyvin pysyviä sekä rasvaliuoisia, ja sellaisina ne voivat kertyä maaperäeliöiden kudoksiin. PBDE-yhdisteitä on havaittu esim. Suomessa otetuista lieronäytteistä (Fjäder 2016).

Taulukko 28. PBDE-yhdisteille lasketut RQ-arvot. Riskiosamäärät on värikoodattu taulukon 18 mukaisesti. Vertailuarvona esitetty riskiosamäärä laskettuna Ruotsissa havaitulla pitoisuudella (IVL & Naturvårdsverket 2017).

Yhdiste	RQ			
	PProduct-max		Ruotsi 95 %	
	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$	$5 \text{ t ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$	$20 \text{ t ha}^{-1} 5 \text{ v}^{-1}$
BDE-209	0,0047	0,0039	0,0011	0,00091
BDE-99	0,0017	0,0016	0,0039	0,0036

6.4.4. Lääkeaineet ja biosidit

Taulukossa 29 on esitetty lääkeaineiden ja biosidien (TCC ja TCS) laskennalliset maaperäpitoisuudet. Korkeimmat pitoisuudet tasapainotilassa saavuttivat fluorikinoloniantibiootit CIF, OF ja NOF. Samat yhdisteet olivat altteimpia kertymään maaperään lietelevityksen toistuessa.

Taulukko 29. Lääkeaineiden ja biosidien laskennallisia pitoisuuksia maaperässä eri ajanhetkinä ja erilaisilla levitysmäärillä ja yhdistekotaista kertymispotentiaalia kuvaava F_{acc-ss} -arvo. (ks. lyhenteet Liite 43 ja Taulukko 5)

Yhdiste	$C_{soil}(0)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		$C_{avg}(30)$ [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		C_{ss} [$\mu\text{g kg}^{-1}$]		F_{acc-ss} [%]	
	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹
ATE	0,016	0,065	0,016	0,063	0,033	0,067	100	3,4
DCF	0,17	0,68	0,15	0,6	0,18	0,68	5,3	0
E2	0,15	0,61	0,07	0,28	0,15	0,61	0	0
IBU	0,54	2,2	0,53	2,1	1,6	2,5	190	14
CBZ	0,055	0,22	0,054	0,22	0,27	0,32	380	46
MET	0,047	0,19	0,046	0,18	0,096	0,2	100	3,4
NOF	1,1	4,3	1,1	4,3	12	11	1000	170
OF	1,1	4,5	1,1	4,5	15	14	1200	210
CIF	2,5	10	2,5	10	55	49	2100	380
SDZ	0,0021	0,0084	0,002	0,008	0,0031	0,0084	46	0,32
TET	1,3	5,3	1,3	5,2	7,8	8,7	490	65
TCC	0,37	1,5	0,37	1,5	3,6	3,5	880	140
TCS	1,5	6,1	1,5	5,9	3,5	6,4	130	6

Lääkeaineiden pitoisuuksia suomalaisilla maa-alueilla on kartoitettu hyvin vähän. RUSSOA-hankkeessa määritettiin muutamien lääkeaineiden pitoisuuksia kahdelta maa-alueelta otetuista näytteistä, jonne yhdyskuntalietettä oli levitetty (Fjäder 2016). Näitä tuloksia on esitetty taulukossa 30.

Taulukko 30. Aiemmin julkaistuja lääkeainepitoisuuksia maaperässä Suomessa (Fjäder 2016).

Yhdiste	Pitoisuus ($\mu\text{g kg}^{-1}$) ^{a)}
ATE	NA
DCF	8–10
CBZ	2–3
MET	8–9
NOF	55–80
OF	130–200
CIF	400–480
TET	32–110
TCS	73–110

Laskennallisesti johdetut pitoisuudet ovat hyvin alhaisia RUSSOA-hankkeessa Suomesta havaittuihin pitoisuuksiin nähden. RUSSOA-hankkeessa analysoitujen näytteiden lukumäärä on pieni. Tästä syystä olisi ensiarvoisen tärkeää, että Suomesta tuotettaisiin jatkossa maantieteellisesti kattavaa aineistoa lääkeaineiden esiintymisestä alueilla, joille yhdyskuntalietetä on levitetty.

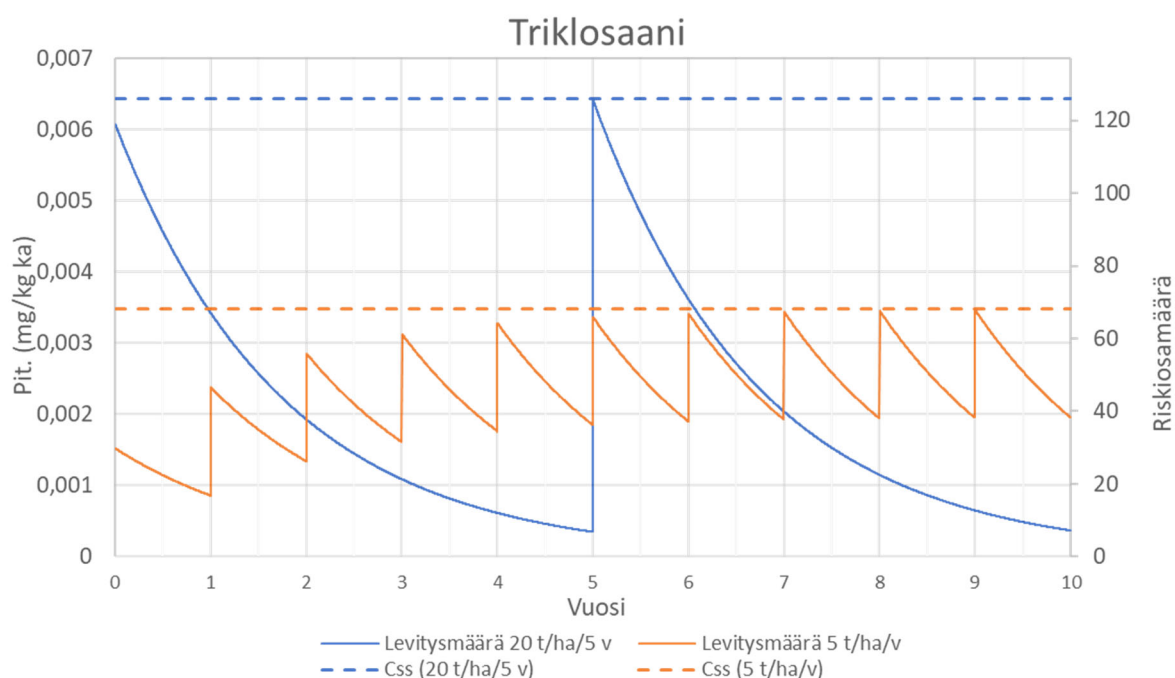
Lääkeaineille ja biosideille lasketut riskiosamäärät on esitetty taulukossa 31. Tarkastelluista 13 lääkeaineesta kymmenen arvioitiin voivan aiheuttaa riskin maaperälle lietevalmisteiden levityksen seu-

rauksena. Tarkastelluista yhdisteistä korkeimman riskiosamäärän saavutti TCS. Sen pitoisuuden ja riskiosamäärän kehitystä on esitetty kuvassa 25. DCF:a ja E2:a lukuun ottamatta kaikki riskiä aiheuttaviksi tunnistetut yhdisteet olivat alttiita kertymään maaperässä. Näiden yhdisteiden pitoisuuksien voidaan olettaa olevan korkeat hetkellisesti lietelevityksen jälkeen. DCF:n pitoisuuksien kehitystä lietelevityksen jälkeen on esitetty kuvassa 26.

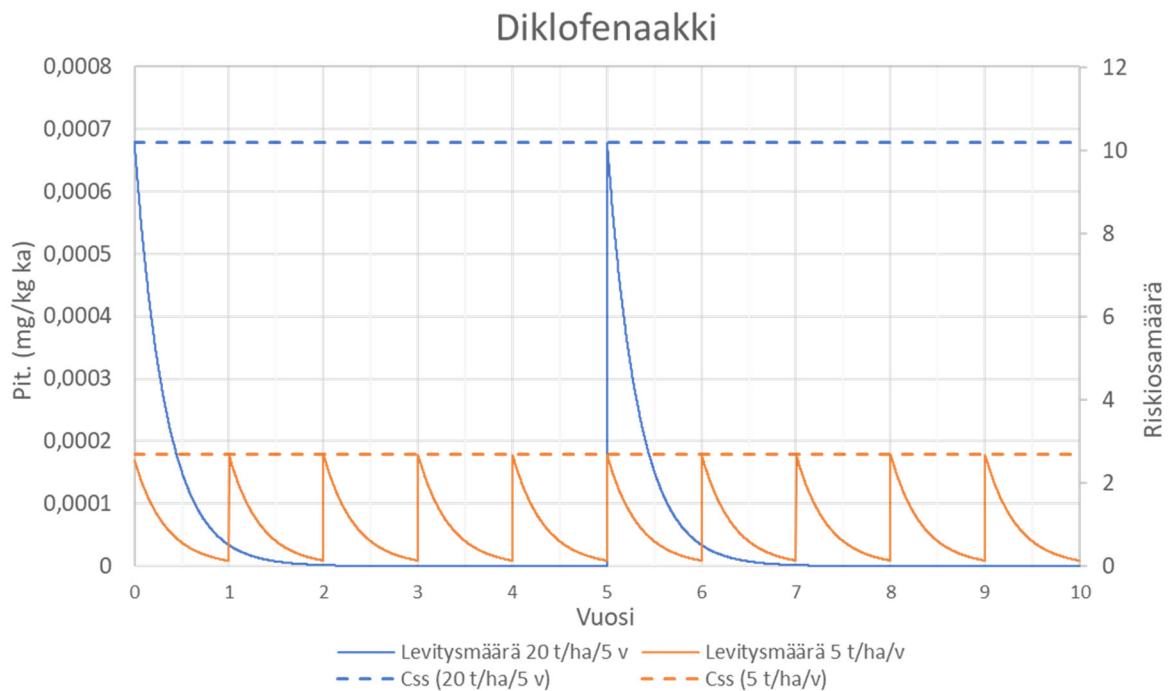
Useimpien lääkeaineiden $PNEC_{maa}$ -arvot on arvioitu $PNEC_{vesi}$ -arvoista EqP-menetelmällä. Tämä pätee kaikkiin niihin lääkeaineisiin, joiden arvioitiin ylittävän $PNEC$ -tasonsa. Näiden aineiden riskinarvioinnin tarkentamiseksi vaadittaisiin maaperäeliöillä tuotettua $PNEC$ -aineistoa.

Taulukko 31. Lääkeaineille ja biosideille lasketut RQ- ja C_{HV} -arvot. Riskiosamäärät on värikoodattu **Virhe. Viitteen lähde ei löytynyt.** mukaisesti. Vertailuarvona esitetty riskiosamäärä laskettuna Ruotsissa havaitulla pitoisuudella (IVL & Naturvårdsverket 2017).

Yhdiste	RQ				C _{HV} (mg kg ⁻¹)		PProduct-tulosten vaihteluväli (mg kg ⁻¹)
	PProduct-max		Ruotsi 95 %				
	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	5 t ha ⁻¹ v ⁻¹	20 t ha ⁻¹ 5v ⁻¹	
TCS	68	130	780	1500	0,011	0,0058	<0,1–0,73
E2	19	76	59	240	0,0039	0,00097	<0,006–0,074
IBU	5,4	8,5	5,9	9,2	0,048	0,031	0,13–0,26
CBZ	5,3	6,4	40	48	0,0049	0,0041	<0,001–0,026
TET	3,8	4,2	21	24	0,17	0,15	<0,07–0,63
DCF	2,7	10	2,3	8,8	0,030	0,0080	0,022–0,081
OF	2,7	2,5	6,4	6	0,20	0,22	<0,04–0,54
CIF	2,4	2,1	18	16	0,50	0,57	<0,2–1,2
NOF	1,9	1,9	19	19	0,26	0,28	<0,04–0,51
MET	0,93	1,9	20	41	0,024	0,012	<0,0008–0,023
TCC	0,097	0,095	0,35	0,35	1,8	1,9	<0,0002–0,18
SDZ	0,028	0,077	-	-			
ATE	0,00066	0,0014	0,0029	0,0060			



Kuva 25. Triklosaenin kertyminen maaperään lietelevitysten toistuessa kahdella eri levitystiheydellä ja -määrällä.



Kuva 26. Diklofenaakin kertyminen maaperään lietelevitysten toistuessa kahdella eri levitystiheydellä ja -määrällä.

6.4.5. Laskennan herkkyystarkastelu

Laskennalle tehtiin yksinkertainen osittaisherkkyystarkastelu. Tarkastelussa oletettiin samalle alueelle levitettävän 5 vuoden välein 20 t ha^{-1} lietevalmistetta, joka sisältää kuiva-aineessa 100 mg kg^{-1} kuvitteellista yhdistettä, jonka puoliintumisaika on 100 vrk ja K_{oc} 1000 l kg^{-1} . Tarkastelu tehtiin hajoamalla ja huuhtoutumalla muokkauskerroksesta poistuville aineille erikseen, muuttamalla kutakin laskennan tuloksiin vaikuttavaa parametria vuorollaan. Tuloksina otettiin ulos laskennan antamat arvot k :lle, $C_{soil}(0)$:lle, $C_{avg}(30)$:lle ja C_{ss} :lle ja tarkasteltiin niiden muutosta laskentaparametrin muutoksen suhteen.

Taulukossa 32 on esitetty, miten muuttujien arvon suurentaminen vaikuttaa laskennan tuloksiin. Kattavammat tulokset on esitetty liitteissä 41 ja 42.

Huuhtoutuvien aineiden poistumisnopeus (k) riippui imeytyvän veden määrästä sekä jakautumiskertoimesta (K_d) ja siihen vaikuttavista muuttujista (K_{oc} , f_{oc}). Huuhtoutuvien yhdisteiden poistumisnopeuteen vaikutti myös muokkauskerroksen paksuus, jonka merkitys kasvoi sen saadessa hyvin pieniä arvoja. Hajoavien yhdisteiden poistumisnopeus puolestaan riippui yhdisteen puoliintumisajan lisäksi aktivoitumisenergiasta (E_a), laskien lineaarisesti tuon arvon kasvaessa. Hajoamiskokeen referenssilämpötilan ja ympäristön lämpötilan erotuksen kasvaessa poistumisnopeus hidastui. Sekä lietevalmisteen haitta-ainepitoisuuden että sen levitysmäärän kasvattaminen kasvattivat haitta-aineen pitoisuutta maaperässä lineaarisesti. Toteutetun tarkastelun mukaan lietevalmisteen levitystiheyden kasvattaminen kasvattaa tasapainotilanteen pitoisuutta (C_{ss}) huomattavasti, erityisesti tiheyden kasvaessa hyvin suureksi.

Taulukko 32. Tulosten muutoksen suunta niihin vaikuttavien muuttujien kasvaessa. Ylöspäin osoittava nuoli tarkoittaa, että tulos kasvaa, ja alaspäin osoittava nuoli, että tulos pienenee.

Muuttuja			Hajoaminen				Huuhtoutuminen			
			k	$C_{soil}(0)$	$C_{avg}(30)$	C_{ss}	k	$C_{soil}(0)$	$S_{avg}(30)$	C_{ss}
↑	ρ_{soil}	Maan ominaispaino	-	↓	↓	↓	-	↓	↓	↓
	D_{soil}	Muokkauserroksen paksuus	-	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	DT_{50}	Yhdisteen puoliintumisaika maaperässä	↓	-	↑	↑	-	-	-	-
	E_A	Aktivoitumisenergia	↓	-	↑	↑	-	-	-	-
	f_{infil}	Sadannan imeytyvä osuus	-	-	-	-	↑	-	↓	↓
	f_{oc}	Maan orgaanisen aineen osuus	-	-	-	-	↓	-	↑	↑
	k_{oc}	Orgaaniseen hiileen normalisoitu jakautumiskerroin	-	-	-	-	↓	-	↑	↑
	k_d	Maa-vesi -jakautumiskerroin	-	-	-	-	↓	-	↑	↑
	$RAIN_{rate}$	Sadanta	-	-	-	-	↑	-	↓	↓
	C_{sludge}	Yhdisteen pitoisuus lietevalmisteessa	-	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑
	M_{sludge}	Lietevalmisteen levitysmäärä	-	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑
	T_{avg}	Ympäristön keskilämpötila	↑	-	↓	↓	-	-	-	-
	T_{ref}	Hajoamiskokeen referenssilämpötila	↓	-	↑	↑	-	-	-	-
	t_{int}	Lietelevitysten välinen aika	-	-	-	↓	-	-	-	↓

7. Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa tietoa jätevesilietepohjaisten fosforilähteiden lannoitusvaikutuksen suuruudesta sekä niiden käytöstä aiheutuvasta mahdollisesta riskistä ihmisen terveydelle ja ympäristölle. Tätä varten tutkittiin pitkäkestoista lannoitusvaikutusta, raskasmetallien biosaatavuutta sekä orgaanisten haitta-aineiden mahdollista siirtymistä korjattavaan kauran ja raiheinän satoon. Lisäksi selvitettiin tutkittujen orgaanisten haitta-aineiden pysyvyyttä maaperässä lietteiden lisäyksen seurauksena. Fosforilannoitusvaikutusta tutkittiin sekä pelkästään jätevesilietteestä valmistetuilla että osittain jätevesilietepohjaisilla fosforilähteillä. Orgaanisten haitta-aineiden mahdollista kulkeutumista kauraan ja raiheinään tutkittiin HSY:n maanparannuskompostilla, Kemicond-käsitellyllä lietteellä ja pyrolysoidulla jätevesilietteellä.

Fosforin pitkäaikaista lannoitusvaikutusta selvitettiin ohran ja raiheinän kolme peräkkäistä kasvukautta kestäneillä kasvatuskokeilla verkkoseinäisessä kasvihuoneessa vuosina 2015–2017. Pelkästään mädätettyä tai kompostoitua jätevesilietettä sisältäneiden fosforilähteiden välitön lannoitusvaikutus oli ohralle vain 7 % ja raiheinälle 9 %. Jätevesilietefosforin pidempikestoinen lannoitusvaikutus ohralle (3–10 %) oli samalla tasolla välittömän vaikutuksen kanssa. On kuitenkin huomattava, että arviot voivat olla jonkin verran aliarvioita johtuen ensimmäisen kasvukauden kylmyydestä. Jätevesilietefosforin lannoitusvaikutus raiheinälle parani kokeen edetessä. Jo ensimmäisen vuoden neljälle niitolle laskettuna se oli noin kaksinkertainen välittömään lannoitusvaikutukseen verrattuna ja kolmen vuoden aikana (10 raiheinäsatoa) 17–38 %. Kaiken kaikkiaan jätevesilietefosforin lannoitusvaikutus jäi siten huomattavasti pienemmäksi kuin mineraalilannoitteella tai kotieläinten lannalla.

Jäteveden puhdistuksessa käytettävien rauta- ja alumiinikemikaalien annosmäärät olivat olennaisia fosforin lannoitusvaikutuksen kannalta, sillä lannoitusvaikutus korreloi negatiivisesti kompostoidun ja mädätetyn jätevesilietteen (Fe+Al)/P -moolisuhteen kanssa. Pyrolysoidun mädätteen ja jätevesilietteen tuhkan kohdalla moolisuhteella ei ollut vaikutusta. Maanparannuskomposti (Metsäpirtin) ja pyrolysoitu mädäte alensivat samaan aikaan lisätyn väkilannoitefosforin saatavuutta raiheinälle.

Lannoitevalmisteasetuksen (EC 2003/2003 ja EC 2019/1009) mukaisista uuttoliuoksista 2 %:nen muuraishappo korreloi parhaiten fosforin lannoitusvaikutuksen kanssa. Muut uuttoliuokset (2 %:nen sitruunahappo ja neutraali ammoniumsitraatti) yliarvioivat sekä välittömän että pidempikestoisien fosforilannoitusvaikutuksen. DGT-menetelmä korreloi raiheinän kohdalla hyvin pidempikestoisien lannoitusvaikutuksen kanssa, ja kyseistä menetelmää tulisikin soveltaa nykyistä enemmän erilaisille fosforilannoitteille. Hankkeen johtopäätöksenä fosforin kierrätyksen tehostamisesta on, että jäteveden puhdistusmenetelmiä ja niiden lopputuloksena syntyviä lietepohjaisia lannoitevalmisteita tulee edelleen kehittää selkeänä tavoitteena fosforin parempi lannoitusvaikutus.

Lietevalmisteista havaittiin 61 orgaanista haitta-ainetta analysoiduista 63:sta. Suppein ainekirjo havaittiin pyrolysoidusta lietteestä (37 yhdistettä) ja laajimmat mädätteestä (58) ja kompostista (57). Koska tässä hankkeessa haitta-aineiden pitoisuudet määritettiin yksittäisistä näytteistä, eri tuotetyyppejä ei voida suoraan vertailla keskenään. Kuten aiemmissakin tutkimuksissa on todettu, mädätys-kompostointi -ketju ei poista pysyviä orgaanisia haitta-aineita.

Tässä hankkeessa toteutettiin maantieteellisesti aiempaa laajempi kartoitus PBDE-yhdisteiden esiintymisestä lietevalmisteissa. Kartoituksessa havaittiin, että näiden yhdisteiden pitoisuudet vaihtelevat näytteissä suuresti. Jotta voitaisiin arvioida, onko havaittu vaihtelu laitosten välistä vai ajallista vaihtelua, tarvittaisiin myös ajallisesti kattavampaa näytteenottoa. Jatkossa olisikin tärkeää selvittää nykyistä kattavammin erilaisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintymistä erilaisissa liete-tuotteissa sekä niiden hajoamista ja kulkeutumista maaperässä.

Tutkimuksen perusteella eri yhdisteet poistuvat pyrolyysissä eri tavoin. Monien yhdisteiden määrät pienenivät, mutta toisten määrät eivät muuttuneet (PFOS, PFNA, PFDS, BAP, BEP, IBU) tai kasvoivat käsittelyn seurauksena (PCM, BGHI, IP, BDE-183). Pyrolyysin vaikutus haitallisiin aineisiin vaatii jatko-tutkimusta. Erityisesti tulisi selvittää, mitä konjugaatteina elimistöstä erittyville lääkeaineille tapah-tuu käsittelyssä.

Hankkeessa tutkituissa kauranjyvissä havaittiin pieniä, pääosin määritysrajan tuntumassa olevia pi-toisuuksia PBDE-yhdisteitä. Lisätyn lietetuotteen määrä ei kuitenkaan korreloinut jyvissä havaittujen pitoisuuksien kanssa, minkä vuoksi kertyvyyskertoimet jäivät epävarmoiksi. Kauran jyvissä havaittiin lääkeaineista ainoastaan karbamatsepiinia, kun raiheinissä havaittiin tämän lisäksi diklofenaakkia ja norfloksasiinia yksittäisissä näytteissä. Tämän hankkeen tulosten perusteella yhdisteiden kasviker-tyvyyksistä ei voida vetää varmoja johtopäätöksiä, vaan lääkeaineiden ja PBDE-yhdisteiden kasviker-tyvyyden luotettavaan arviointiin tarvitaan lisäkokeita. Jotta jatkotutkimuksissa voidaan arvioida yhdisteiden kertymistä luotettavasti ja mahdollinen kertyminen tai kertymättömyys kasveihin voi-daan luotettavasti osoittaa, kasvualustan pitoisuuksien tulee edustaa useita, riittävän korkeita pitoi-suustasoja. Kauran osuutta ihmisen PBDE-saantiin tai orgaanisten lannoitevalmisteiden vaikutusta ihmisen kauratuotteiden kautta tulevaan PBDE-yhdisteiden saantiin ei voida arvioida, koska riittävän yksityiskohtaista tietoa ihmisen kauran saannista ei ole saatavilla.

Tässä tutkimuksessa käytettyjä ekotoksikologisia testimenetelmiä voidaan hyödyntää ympäristöriskin alustavaan arviointiin. Näiden testien tulokset kertovat vain testattavan näyteliuksen toksisuudesta, minkä vuoksi näytteiden ympäristötoksisuutta ehdotetaan lisätutkittavaksi aina, jos näyte on osoit-tanut selvää toksisuutta. Akuutit toksisuustestit eivät myöskään paljasta pitkäikäisten ja kertyvien haitta-aineiden kroonisia vaikutuksia. Tulosten luotettavuuden parantamiseksi lietetuotteiden haital-lisuutta ympäristölle tulisi tutkia niillä eliölajeilla, jotka elävät maaperässä, eli lieroilla ja muilla maaperäeliöillä sekä kasveilla tehtävällä itävyy-, kasvu- ja kertyvyystesteillä.

Ympäristöriskinarvioinnin perusteella tunnistettiin kymmenen lääkeainetta, joiden arvioitiin ylittävän maaperässä haitattomiksi arvioidut pitoisuustasot ja siten aiheuttavan riskiä maaperässä lietelevityk-sen seurauksena. Näihin lukeutui mm. tarkastellut fluorikinoloni-antibiootit, DCF ja TCS. Lisäksi mo-nien lääkeaineiden arvioitiin voivan kertyä maaperään lietelevitysten toistuessa. Viisi PAH-yhdistettä (BAP, BGHI, BBF, BAA ja BKF) ylitti tarkastelussa riskiosamäärän 0,1. PFAA- ja PBDE-yhdisteiden ei tunnistettu aiheuttavan riskiä maaperässä, mutta niiden arvioitiin kertyvän maaperään levitysten toistuessa. PFOS, PFOA ja PBDE:t on listattu Tukholman sopimukseen, joka pyrkii rajoittamaan ja kieltämään ympäristön ja ihmisen kannalta kaikkein hankalimpien yhdisteiden käyttöä ja päästöjä. Nämä yhdisteet täyttävät POP-yhdisteiden kriteerit (kaukokulkeutuvuus, pysyvyys, biokertyvyys) ja sen vuoksi tämän maaperäriskinarvioinnin tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Pysyvien orgaanis-ten yhdisteiden osalta perinteinen riskinarvio todennäköisesti aliarvioi todellisia riskejä, johtuen läh-töarvoihin liittyvistä epävarmuuksista ja niiden puutteellisuudesta sekä erityisesti kulkeutuvien ja biokertyvien aineiden tapauksessa tarkastelukehikon riittämättömyydestä.

Monille yhdisteille riskinarvioinnissa käytetyt PNEC-arvot on johdettu vesieliöillä tehtyjen toksisuus-testien tuloksista, joten ne voivat ali- tai yliarvioida todellisia vaikutuksia maaperässä. Niille yhdisteil-le, joiden tasapainojakautumismenetelmällä johdettu PNEC-arvo ylittyy, tulisi ensi tilassa tuottaa toksisuustietoa maaperäeliöillä. Lisäksi yhdyskuntalietteistä valmistettujen lopputuotteiden tarkaste-lussa tulisi huomioida se, että niihin päätyy lukuisia haitallisia yhdisteitä erilaisista päästölähteistä. Tässä tarkastelussa huomioitiin kuitenkin vain muutamia yhdisteitä, joiden tuloksiin hankkeen johto-päätökset perustuvat.

8. Lähdeluettelo

- Ahrens, L., Taniyasu, S., Yeung, L., W., Y., Yamashita N., Lam, P., K., S. & Ebinghaus, R., 2010. Distribution of polyfluoroalkyl compounds in water, suspended particulate matter and sediment from Tokyo Bay, Japan. *Chemosphere* 79: 266–272.
- Amundsen C.E., Sørheim R., Forfang I., Hartnik T., Aasen R., Næs K. & Eggen T. 2008. Screening of polyfluorinated organic compounds at four fire training facilities in Norway. *Norwegian Pollution Control Authority* 2444/2008.
- Bengtsson-Palme J. & Larsson J. 2016. Concentrations of antibiotics predicted to select for resistant bacteria: Proposed limits for environmental regulation. *Environment International* 86: 140–149.
- Bizkarguenaga, E., Iparraguirre, A., Oliva, E., Quintana, J.B., Rodil, R., Fernández, L.A., Zuloaga, O. & Prieto, A. 2016. Uptake of polybrominated diphenyl ethers by carrot and lettuce crops grown in compost-amended soils. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 3847–3859.
- Bu Q., Shi X., Yu G., Huang J. & Wang B. 2016. Assessing the persistence of pharmaceuticals in the aquatic environment: Challenges and needs. *Emerging contaminants* 2: 145–147.
- Burton, G. A., De Zwart, D., Diamond, J., Dyer, S., Kapo, K.E., Liess, M. & Posthuma, L. 2012. Making ecosystem reality checks the status quo. *Environmental Toxicology and Chemistry* 31(3): 459–468.
- Cincinelli, A., Martellini, T., Misuri, L., Lanciotti, E., Sweetman, A., Laschi, S. & Palchetti, I. 2012. PBDEs in Italian sewage sludge and environmental risk of using sewage sludge for land application. *Environmental Pollution* 161: 229–234.
- Carlsson, C., Johansson, A.-K., Alvan, G., Bergman, K. & Kühler, T. 2006. Are pharmaceuticals potent environmental pollutants? Part I: Environmental risk assessments of selected active pharmaceutical ingredients. *Science of the Total Environment* 364: 67–87.
- Carr D.L., Morse, A.N., Zak J.C. & Anderson T.A. 2011. Microbially Mediated Degradation of Common Pharmaceuticals and Personal Care Products in Soil Under Aerobic and Reduced Oxygen Conditions. *Water Air Soil Pollution* 216: 633–642.
- Domingo, J.L., Martí-Cid, R., Castell, V. & Llobet, J.M. 2008. Human exposure to PBDEs through the diet in Catalonia, Spain: Temporal trend: A review of recent literature on dietary PBDE intake. *Toxicology* 248: 25–32.
- EC 2003. 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.
- EFSA 2018. Risk to human health related to the presence of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid in food. *EFSA Journal* 2018;16(12):5194
- Elliott, H.A., Potter, J.M., Kang, J.-H. & Brandt, R.C. 2005. Neutral ammonium citrate extraction of biosolids phosphorus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36: 2447–2459.
- Eriksen, G.S., Amundsen, C.E., Bernhoft, A., Eggen, T., Grave, K., Hallig-Sørensen, B., Källqvist, T., Sogn, T. & Sverdrup, L. 2009. Risk assessment of contaminants in sewage sludge applied on Norwegian soils. Opinion from the Panel on Contaminants in the Norwegian Scientific Committee for Food Safety. Norwegian Scientific Committee for Food Safety (VKM), Oslo, Norja. Saatavilla osoitteesta: <http://www.vkm.no/dav/2ae7f1b4e3.pdf>
- EU 2012. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. COM(2011) 876 final, 2011/0429 (COD), Brussels, 31.1.2012.
- Eljarrat, E., Marsh, G., Labandeira, A. & Barceló. 2008. Effect of sewage sludges contaminated with polybrominated diphenylethers on agricultural soils. *Chemosphere* 71: 1079–1086. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.10.047
- Fjäder P. 2016. Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherrakentamisen riskit RUSSOA I-III Loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43. 58 s. + liitteet.

- Fries G.F. 1996. Ingestion of sludge applied organic chemicals by animals. *Science of the Total Environment* 185: 93–108.
- Ghisi R., Vamerali T. & Manzetti S. 2019. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAA) in agricultural plants: A review. *Environmental Research* 169: 326–341. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>.
- Grattan, S.R. & Grieve, C.M. 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 78: 127–157.
- Guerra P., Kim M., Kinsman L., Ng T., Alaee M. & Smyth S.A. 2014. Parameters affecting the formation of perfluoroalkyl acids during wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials* 272:148–154.
- Hanslin, H.M. & Eggen, T. 2006. Opptak av bromerte flammehemmere i planter. *Bioforsk Rapport Vol 1 Nr 83-B*. <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/bitstream/handle/11250/2505487/Bioforsk-Rapport-2006-01-83.pdf?sequence=1>
- Hartmann, A., Alder, A. C., Koller, T. & Widmer, R. M. 2009. Identification of fluoroquinolone antibiotics as the main source of umuC genotoxicity in native hospital wastewater. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17: 377–382.
- Hoke R.A., Boucherle L.D., Ferrell B.D. & Buck R.C. 2012. Comparative acute freshwater hazard assessment and preliminary PNEC development for eight fluorinated acids. *Chemosphere* 87: 725–733.
- Holten Lützhøft, H.-C., Halling-Sørensen, B. & Jørgensen, S.E. 1999. Algal Toxicity of Antibacterial Agents Applied in Danish Fish Farming. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 36: 1–6.
- Hoppo, S.D., Elliott, D.E. & Reuter, D.J. 1999. Plant tests for diagnosis phosphorus deficiency in barley (*Hordeum vulgare* L). *Australian Journal of Experimental Botany* 39: 857–872.
- Howard P.H., Boethling R.S., Jarvis W.F., Meylan W.M. & Michalenko E.M. 1991. *Handbook of Environmental Degradation Rates*. Lewis Publishers: Chelsea, MI.
- Huang, H., Zhang, S. & Christie, P. 2011. Plant uptake and dissipation of PBDEs in soils of electronic waste recycling sites. *Environmental Pollution* 159: 238–243.
- Huang, X.-L., Chen, Y. & Shenker, M. 2012. Dynamics of phosphorus phytoavailability in soil amended with stabilized sewage sludge materials. *Geoderma* 170: 144–153.
- Huhtala S., Munne P., Nakari T., Nuutinen J., Perkola N., Sainio P., Schultz E. & Schultz L. 2011. WP3 innovative approaches to chemical controls of Hazardous substances - Country report of Finland. http://www.cohiba-project.net/publications/en_GB/publications/
- ISO 13829:2000. Water quality – Determination of the genotoxicity of water and waste water using the umu-test
- ISO 11348-3. 2007. Water quality. Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emission of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test). Part 3: Method using freeze-dried bacteria.
- IVL & Naturvårdsverket 2019. Miljöövervakningsdata Screening av miljögifter. Verkkosivu: <https://dvsb.ivl.se/dvss/DataSelect.aspx> [Viitattu 25.6.2019]
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T. & Heikkinen, J. 2015. Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science & Technology* 49: 2115–2122.
- Kasurinen, V., Munne, P., Mehtonen, J., Turkmen, A., Seppälä, T., Mannio, J., Verta, M. & Äystö, L. 2014. Orgaaniset haitta-aineet puhdistamolietteisissä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2014.
- Keskinen, R., Suojala-Ahlfors, T., Sarvi, M., Hagner, M., Kaseva, J., Salo, T., Uusitalo, R. & Rasa, K. 2020. Granulated broiler manure based organic fertilizers as a sources of plant available nitrogen. *Environmental Technology & Innovation*. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100734>
- Khan S. & Cao Q. 2012. Human health risk due to consumption of vegetables contaminated with carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Soils and Sediments* 12: 178–84. DOI <https://doi.org/10.1007/s11368-011>

- Kim, M., Li, L.Y., Gorgy, T. & Grace, J.R. 2017. Review of contamination of sewage sludge and amended soils by polybrominated diphenyl ethers. *Environmental Pollution* 220: 753–765.
- Kiviranta, H., Ovaskainen, M.-L. & Vartiainen, T. 2004. Market basket study on dietary intake of PCDD/Fs, PCBs, and PBDEs in Finland. *Environment International* 30:923–932.
- Kärman A., Wang T. & Kallenborn R. 2018. PFAAs in the Nordic environment: Screening of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAAs) and Extractable Organic Fluorine (EOF) in the Nordic Environment. *TemaNord*, ISSN 0908-6692; 2019:515
- Lazcano R.K., de Perre C., Mashtare M.L. & Lee L.S. 2019. Per- and polyfluoroalkyl substances in commercially available biosolid-based products: The effect of treatment processes. *Water Environment Research* 91: 1669–1677. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1174>
- Leytem, A.B. & Westermann, D.T. 2005. Phosphorus availability to barley from manures and fertilizers in calcareous soil. *Soil Science* 170: 401–412.
- Liu J., Avendaño S.M. 2013. Microbial degradation of polyfluoroalkyl chemicals in the environment: A review. *Environment International*, 61: 98–114, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.08.022>.
- Mackay D., Shiu W.Y., Ma, K.-C. & Lee S.C. 2006. *Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals*. CRC Press Taylor and Francis.
- Marttinen S., Suominen K., Lehto M., Jalava T. & Tampio E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti135.pdf>
- Mattsoff L. 2005. Torjunta-aineiden maaperän eliöille aiheuttamien riskien arviointi – toistuvan käytön rajoituksen tarkentaminen. *Suomen ympäristö* 804/2005.
- Mashtare M.L., Khan B. & Lee L.S. 2011. Evaluating stereoselective sorption by soils of 17 α -estradiol and 17 β -estradiol. *Chemosphere* 82: 847–852. http://www.mavi.fi/attachments/mavi/viljelijatuot/hakuoppaatjaohjeet/ymparistotuenperusjalaisatomenpiteidenoppaat/5FSJ2pUCH/912996_lannoiteopas_LR_vii.pdf.
- McCarthy, L., H., Loyo-Rosales, J., E., Raby, M., Payne, M., Huber, A., Lavery, J., Caputa, K., Taylor, L. & Falls, A. 2015. Risks Associated with Municipal Biosolids Application to Agricultural Lands in Canada – Literature Review, March 2015. Canadian Municipal Water Consortium, Canada Water Network. 148 p. + appendixes 61 p.
- Marttinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Salo, T., Kapuinen, P., Rintala, J., Vikman, M., Kapanen, A., Torniainen, M., Maunuksela, L., Suominen, K., Sahlström L. & Herranen, M. 2013. Biokaasulaitosten lopputuotteet lannoitevalmistena. MTT raportti 82, Jokioinen, Finland. 70 s. <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti82.pdf>
- Marttinen S., Suominen K., Lehto M., Jalava T. & Tampio E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. Biosafe-hankkeen loppuraportti. MTT raportti 135.
- Milinic J., Lacorte S., Vidal M. & Rigol A. 2015. Sorption behaviour of perfluoroalkyl substances in soils. *Science of the Total Environment* 511: 53–71.
- Montagner C.C., Jardim W.F., Von der Ohe P.C. & Umbuzeiro G.A. 2013. Occurrence and potential risk of triclosan in freshwaters of São Paulo, Brazil—the need for regulatory actions. *Environmental Science and Pollution Research* 8/2013. Paraíba L.C., Quieroz S.C.N., de Souza D.R.C., Saito M.L. 2011. Risk Simulation of Soil Contamination by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Sewage Sludge used as Fertilizers. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 22: 1156–1163.
- Miller, M. & O'Connor, G.A. 2009. The longer-term phytoavailability of biosolids-phosphorus. *Agronomy Journal* 101: 889–896.
- Kevin E. Mueller, K.E., Mueller-Spitz, S.R., Henry, H.F., Vonderheide, A.P., Soman, R.S., Kinkle, B.K. & Shann, J.R. 2006. Fate of pentabrominated diphenyl ethers in soil: abiotic sorption, plant uptake, and the impact of interspecific plant interactions. *Environmental Science & Technology* 40: 6662–6667.

- Murphy, J. & Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31–36.
- Navarro, I., de la Torre, A., Sanz, P., Porcel, M.A. & Pro, J. 2017. Gregoria Carbonell, de los Ángeles, M. 2017. Uptake of perfluoroalkyl substances and halogenated flame retardants by crop plants grown in biosolids-amended soils. *Environmental Research* 152: 199–206.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.018>.
- Nowara A., Burhenne J. & Spiteller M. 1997. Binding of Fluoroquiolone Carboxylic acid Derivatives to Clay Minerals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45: 1459–1463.
- O'Connor, G.A., Sarkar, D., Brinton, S.R., Elliott, H.A. & Martin, F.G. 2004. Phytoavailability of biosolids phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 33: 703–712.
- Oladeji, O.O., O'Connor, G.A. & Sartain, J.B. 2008. Relative phosphorus phytoavailability of different phosphorus sources. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39: 2398–2410.
- Orias, F., Perrodin, Y. 2013. Characterisation of the ecotoxicity of hospital effluents: A review. *Science of the Total Environment* 454–455, 250–276.
- Pan M. & Chu L.M. 2016. Adsorption and degradation of five selected antibiotics in agricultural soil. *Science of the Total Environment* 545–546: 48–56.
- Paraíba L.C., Quieroz S.C.N., de Souza D.R.C. Saito M.L. 2011. Risk Simulation of Soil Contamination by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Sewage Sludge used as Fertilizers. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 22(6): 1156–1163.
- Phillips D.H. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the diet. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 443: 139–47. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(99\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(99)00016-2)
- Qi P., Wang Y., Mu J. & Wang J. 2011. Aquatic predicted no-effect-concentration derivation for perfluorooctane sulfonic acid. *Environmental Toxicology and Chemistry* 30: 836–842.
- Zheng, Q., Zhang, R., Wang, Y., Pan, X., Tang, J. & Zhang, G. 2012. Occurrence and distribution of antibiotics in the Beibu Gulf, China: Impacts of river discharge and aquaculture activities. *Marine Environmental Research* 78: 26–33.
- Rasa, K., Ylivainio, K., Rasi, S., Eskola, A., Uusitalo, R. & Tiilikkala, K. 2015. Jätevesilietteen pyrolyysi – laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeita. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 21/2015. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 25 s.
- Reinikainen, J., Perkola, N., Takala, M., Äystö, L. & Ahkola, H. 2019. Perfluorattuje alkyyliyhdisteiden ympäristötutkimukset ja riskinarviointi. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 21/2019. 96 s. + liitteet.
- Rosko, M., Jędrzejczak, R. & Szymczyk, K. 2014. Polychlorinated biphenyls (PCBs), polychlorinated diphenyl ethers (PBDEs) and organochlorine pesticides in selected cereals available on the Polish retail market. *Science of The Total Environment* 466–467: 136–151.
- Sáez M., de Voogt, P. & Parsons J.R. 2008. Persistence of perfluoroalkylated substances in closed bottle tests with municipal sewage sludge. *Environ Science and Pollution Research* 15: 472–477.
- Schecter, A., Shah, N., Colacino, J.A., Sawant, M., Brummitt, S.I., Harris, T.R., Lohmann, N. & Päpke, O. 2009. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) levels in fruit, vegetables, and food of vegetable origin purchased in the United States. *Toxicological & Environmental Chemistry* 91: 643–652.
- Sellström, U., de Wit, C.A., Lundgren, N. & Tysklind, M. 2005. Effect of Sewage-Sludge Application on Concentrations of Higher-Brominated Diphenyl Ethers in Soils and Earthworms. *Environmental Science & Technology* 39: 9064–9070. DOI: 10.1021/es051190m.
- Sharpley, A.N. & Moyer, B. 2000. Phosphorus forms in manure and compost and their release during simulated rainfall. *Journal of Environmental Quality* 29: 1462–1469.
- Sternbeck J., Blytt L.D., Gustavson K., Frankki S. & Bjergström M. 2011. Using sludge on arable land - effect based levels and long-term accumulation for certain organic contaminants. *TemaNord* 2011:506. Nordic Council of Ministers.
- Suominen, K., Verta, M. & Marttinen, S. 2014. Hazardous organic compounds in biogas plant and products – soil burden and risk to food safety. *Science of the Total Environment* 491–492: 192–199.

- Tolls J. 2001. Sorption of veterinary pharmaceuticals in soils: A review. *Environmental Science & Technology* 35: 3397–3406
- UNEP 2014. Report of the Persistent Organic Pollutants Review Committee on the work of its tenth meeting, Addendum, Risk profile on decabromodiphenyl ether (commercial mixture, c-decaBDE). Persistent Organic Pollutants Review Committee Tenth meeting Rome, 27–30 October 2014
- Verbruggen E.M.J. 2012. Environmental risk limits for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) For direct aquatic, benthic, and terrestrial toxicity. RIVM report 607711008/2012.
- Verlicchi, P. & Zambello, E. 2015. Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil - A critical review. *Science of the Total Environment* 538: 750–67.
- Vestergren R., Orata F., Berger U. & Cousins I.T. 2013. Bioaccumulation of perfluoroalkyl acids in dairy cows in a naturally contaminated environment. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 7959–69.
- Vieno N. 2007. Occurrence of pharmaceuticals in Finnish sewage treatment plants, surface waters, and their elimination in drinking water treatment processes. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.
- Vieno N., Sarvi M., Salo T., Rämö S., Ylivainio K., Pitkänen T. & Kusnetsov J. 2018. Puhdistamolietteiden sisältämien haitta-aineiden aiheuttamat riskit lannoitekäytössä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
- Vilpanen, M. & Toivikko, S. 2017. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46.
- Vogel, T., Nelles, M. & Eichler-Löbermann, B. 2015. Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. *Ecological Engineering* 83: 466–478.
- Von Hellens A. 2015. Pharmaceuticals leaching from biosolids amended soils. Master's thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Aquatic Sciences and Assessments.
- Vrkoslavová, J., Demnerová, K., Macková, M., Zemanová, T., Macek, T., Hajšlová, J., Pulkrabová, J., Hrádková, P. & Stiborová, H. 2010. Absorption and translocation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) by plants from contaminated sewage sludge. *Chemosphere* 81: 381–386.
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publications* 63: 1–44.
- Walters E., McClellan K. & Halden R.U. 2010. Occurrence and loss over three years of 72 pharmaceuticals and personal care products from biosolids-soil mixtures in outdoor mesocosms. *Water Research* 44: 6011–6020.
- Wang, Y., Rose, T., Jeong, K., Kretzschmar, T. & Wissuwa, M. 2016. The knowns and unknowns of phosphorus loading into grains, and implications for phosphorus efficiency in cropping systems. *Journal of Experimental Botany* 67: 1221–1229.
- Wang, Z., Na, G., Ma, X., Ge, L., Lin, Z. & Yao Z. 2015. Characterizing the distribution of selected PBDEs in soil, moss and reindeer dung at Ny-Ålesund of the Arctic. *Chemosphere* 137: 9–13.
- Wild S.R., Waterhouse K.S., McGrath S.P. & Jones K.C. 1990. Organic contaminants in an agricultural soil with a known history of sewage sludge amendments: polynuclear aromatic hydrocarbons. *Environmental Science & Technology* 24: 1706–11. DOI: 10.1021/es00081a013
- Xu, J., Wu, L. & Chang, A.C. 2009. Degradation and adsorption of selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in agricultural soil. *Chemosphere* 77: 1299–1305.
- Yang, J.-F., Ying, G.-G., Yang, L.-H., Hao, J.-L., Liu, F., Tao, R., Yu, Z.-G. & Peng, P. 2009. Degradation behavior of sulfadiazine in soils under different conditions. *Journal of Environmental Science and Health Part B* 44: 241–248.
- Ylivainio, K., Jauhiainen, L., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2018. Waterlogging severely retards P use efficiency of spring barley (*Hordeum vulgare*). *Journal of Agronomy and Crop Science* 204: 74–85.
- Ylivainio, K., Jermakka, J., Wikberg, H. & Turtola, E. 2019. Lämpökemiallisen käsittelyn vaikutus jätevesilietefosforin lannoitusarvoon: Jätevesien fosfori kierto on lannoitteeksi (PRecover) –

- hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 3/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 67 s.
- Ylivainio, K., Lehti, A., Sarvi, M. & Turtola, E. 2017. Report on P availability according to Hedley fractionation and DGT-method. BONUS deliverable 3.4, 20 s.
https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt_en/projects/promise/Publications/Report%20on%20P%20availability%20according%20to%20Hedley%20fractionation%20and%20DGT-method.pdf
- Ylivainio, K., Sarvi, M., Lemola, R., Uusitalo, R. & Turtola, E. 2014. Regional P stocks in soil and in animal manure as compared to requirement of plants in Finland. MTT Report 124.
<http://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/481761/mttraportti124.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ylivainio, K. & Turtola, E. 2009. Kotieläintalouden ylijäämäfosfori kasvintuotannossa s. 65–160. Teoksessa: Suomen kotieläintalouden fosforikierto – säätöpotentiaali maatilolla ja aluetasolla. Maa- ja elintarviketalous 138. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met138.pdf>
- Österås, A.H., Allmyr, M. & Sternbeck J. 2015. Screening of Organic Pollutants in Sewage Sludge Amended Arable Soils. Naturvårdsverket, Report 2015-11–24, Assignment ref: 10196232. 59 p.
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A883253&dsid=4491>

Liite 1. Ohran sato (g astia⁻¹), satoindeksit (SI) ja tuhannen siemenen paino (tsp, g), astiakokeissa vuosina 2015–2017. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Vuosi 2015					Vuosi 2016					Vuosi 2017					Σjyvästo
	jyvästo	olkisato	SI	tsp	jyvästo	olkisato	SI	tsp	jyvästo	olkisato	SI	tsp	jyvästo	olkisato	tsp	
Kontrolli	15,0 ^a	14,8 ^{a-d}	52,0 ^{a-d}	35,1 ^{ab}	10,1 ^a	11,1 ^a	47,3 ^{ab}	19,7 ^a	3,8 ^a	5,4 ^{ab}	44,4 ^{ab}	17,7 ^a	3,8 ^a	5,4 ^{ab}	17,7 ^a	28,9
A (200)	34,7 ^{c-f}	19,8 ^{a-f}	63,5 ^{cd}	42,5 ^{a-e}	13,0 ^{ab}	11,7 ^a	52,6 ^{a-d}	19,1 ^a	8,7 ^{a-d}	9,5 ^{a-d}	48,8 ^{ab}	24,5 ^{a-d}	8,7 ^{a-d}	9,5 ^{a-d}	24,5 ^{a-d}	56,5
A (400)	42,6 ^f	24,2 ^{c-g}	63,8 ^d	46,2 ^{b-e}	16,2 ^{ab}	14,2 ^{abcd}	53,3 ^{a-d}	22,7 ^{abc}	12,7 ^{cd}	14,2 ^{a-e}	48,4 ^{ab}	23,1 ^{a-d}	12,7 ^{cd}	14,2 ^{a-e}	23,1 ^{a-d}	71,5
B (200)	20,4 ^{a-e}	13,8 ^{abc}	59,4 ^{a-d}	36,2 ^{a-d}	13,6 ^{ab}	14,8 ^{abcd}	50,1 ^{a-d}	21,3 ^{ab}	4,1 ^a	4,7 ^a	47,9 ^{ab}	19,2 ^{ab}	4,1 ^a	4,7 ^a	19,2 ^{ab}	38,1
B (400)	31,9 ^{a-f}	21,9 ^{b-f}	58,8 ^{a-d}	40,5 ^{a-e}	22,0 ^{abc}	15,5 ^{abcd}	58,0 ^{a-d}	22,6 ^{abc}	8,9 ^{a-d}	14,1 ^{a-e}	38,5 ^{ab}	22,2 ^{abc}	8,9 ^{a-d}	14,1 ^{a-e}	22,2 ^{abc}	62,8
C (200)	31,6 ^{a-f}	20,6 ^{b-f}	59,7 ^{a-d}	42,2 ^{a-e}	19,1 ^{abc}	15,2 ^{abcd}	55,4 ^{a-d}	22,3 ^{abc}	10,0 ^{abc}	14,1 ^{a-e}	43,9 ^{ab}	23,9 ^{a-d}	10,0 ^{abc}	14,1 ^{a-e}	23,9 ^{a-d}	60,7
C (400)	34,4 ^{c-f}	24,9 ^{d-g}	56,9 ^{a-d}	40,3 ^{a-e}	20,6 ^{abc}	17,2 ^{abcd}	54,5 ^{a-d}	24,2 ^{abc}	12,0 ^{bcd}	8,8 ^{a-d}	57,3 ^{ab}	25,4 ^{bcd}	12,0 ^{bcd}	8,8 ^{a-d}	25,4 ^{bcd}	67,0
D (200)	19,7 ^{a-d}	14,7 ^{bc}	57,5 ^{a-d}	33,5 ^a	14,5 ^{ab}	11,3 ^a	55,7 ^{a-d}	22,6 ^{abc}	6,4 ^{abc}	7,8 ^{abc}	44,9 ^{ab}	24,3 ^{a-d}	6,4 ^{abc}	7,8 ^{abc}	24,3 ^{a-d}	40,6
D (400)	19,0 ^{abc}	19,4 ^{b-f}	49,1 ^{ab}	35,5 ^{abc}	13,6 ^{ab}	13,8 ^{ab}	49,4 ^{a-d}	20,3 ^a	6,6 ^{abc}	7,9 ^{abc}	46,9 ^{ab}	22,0 ^{abc}	6,6 ^{abc}	7,9 ^{abc}	22,0 ^{abc}	39,1
E (200)	36,5 ^{def}	24,0 ^{c-g}	60,1 ^{a-d}	43,7 ^{a-e}	24,0 ^{bc}	15,2 ^{abcd}	60,6 ^{bcd}	24,2 ^{abc}	14,1 ^d	11,1 ^{a-d}	56,2 ^{ab}	25,6 ^{bcd}	14,1 ^d	11,1 ^{a-d}	25,6 ^{bcd}	74,6
E (400)	40,7 ^f	30,0 ^{f-i}	57,5 ^{a-d}	42,9 ^{a-e}	19,4 ^{abc}	16,2 ^{abcd}	54,3 ^{a-d}	23,4 ^{abc}	13,2 ^{cd}	9,3 ^{a-d}	58,8 ^{ab}	25,9 ^{bcd}	13,2 ^{cd}	9,3 ^{a-d}	25,9 ^{bcd}	68,9
F (200)	41,4 ^f	38,4 ^{h-k}	51,8 ^{a-d}	44,5 ^{a-e}	30,9 ^{cd}	20,7 ^{cd}	59,7 ^{a-d}	28,1 ^{cd}	23,5 ^e	16,9 ^{cde}	58,4 ^{ab}	26,4 ^{cd}	23,5 ^e	16,9 ^{cde}	26,4 ^{cd}	95,8
F (400)	40,6 ^f	41,5 ^k	49,4 ^{a-f}	45,7 ^{b-e}	34,7 ^d	20,7 ^{dd}	62,2 ^{cd}	34,4 ^{de}	30,1 ^e	18,8 ^{de}	62,1 ^b	34,0 ^e	30,1 ^e	18,8 ^{de}	34,0 ^e	105,4
G (200)	15,9 ^{ab}	9,8 ^a	61,7 ^{bcd}	34,7 ^{ab}	12,7 ^{ab}	12,6 ^a	41,7 ^a	20,6 ^a	3,5 ^a	6,4 ^{abc}	38,5 ^{ab}	20,6 ^{abc}	3,5 ^a	6,4 ^{abc}	20,6 ^{abc}	32,0
G (400)	27,5 ^{a-f}	15,9 ^{a-e}	63,1 ^{bcd}	40,4 ^{a-e}	11,3 ^a	11,8 ^a	48,0 ^{ab}	21,8 ^{abc}	8,5 ^{a-d}	9,5 ^{a-d}	47,4 ^{ab}	23,4 ^{a-d}	8,5 ^{a-d}	9,5 ^{a-d}	23,4 ^{a-d}	47,4
H (200)	19,6 ^{a-d}	12,4 ^{ab}	60,7 ^{a-d}	36,6 ^{a-d}	13,8 ^{ab}	14,1 ^{abc}	49,2 ^{abc}	19,1 ^a	5,0 ^{ab}	9,2 ^{a-d}	35,9 ^a	23,7 ^{a-d}	5,0 ^{ab}	9,2 ^{a-d}	23,7 ^{a-d}	38,5
H (400)	35,2 ^{c-f}	21,3 ^{b-f}	62,1 ^{bcd}	44,5 ^{a-e}	14,5 ^{ab}	12,4 ^a	53,5 ^{a-d}	20,3 ^a	6,6 ^{abc}	10,8 ^{a-d}	38,8 ^{ab}	22,7 ^{a-d}	6,6 ^{abc}	10,8 ^{a-d}	22,7 ^{a-d}	51,6
I (200)	32,6 ^{b-f}	23,7 ^{c-g}	57,7 ^{a-d}	39,7 ^{a-e}	13,5 ^{ab}	15,7 ^{abcd}	45,6 ^a	21,3 ^{ab}	6,1 ^{abc}	8,3 ^{a-d}	42,6 ^{ab}	22,6 ^{abc}	6,1 ^{abc}	8,3 ^{a-d}	22,6 ^{abc}	52,2
I (400)	29,8 ^{b-f}	29,4 ^{f-i}	50,1 ^{a-d}	39,7 ^{a-e}	15,2 ^{ab}	14,8 ^{abcd}	51,3 ^{a-d}	27,0 ^{bc}	8,6 ^{a-d}	11,4 ^{a-d}	42,9 ^{ab}	21,9 ^{abc}	8,6 ^{a-d}	11,4 ^{a-d}	21,9 ^{abc}	57,3
J (200) + SF (25)	43,5 ^f	28,2 ^{fgh}	60,7 ^{a-d}	45,0 ^{a-e}	12,7 ^{ab}	14,1 ^{ab}	46,7 ^{ab}	19,7 ^a	12,0 ^{bcd}	15,9 ^{b-e}	42,7 ^{ab}	21,0 ^{abc}	12,0 ^{bcd}	15,9 ^{b-e}	21,0 ^{abc}	68,2
K (200) + SF (25)	33,4 ^{b-f}	25,3 ^{d-g}	56,8 ^{a-d}	41,2 ^{a-e}	15,1 ^{ab}	13,5 ^{ab}	52,5 ^{a-d}	20,9 ^{ab}	6,7 ^{abc}	9,6 ^{a-d}	41,2 ^{ab}	19,5 ^{abc}	6,7 ^{abc}	9,6 ^{a-d}	19,5 ^{abc}	55,2
SF (10)	20,1 ^{a-d}	15,8 ^{b-e}	56,0 ^{a-d}	36,8 ^{a-d}	13,0 ^{ab}	13,0 ^a	49,6 ^{a-d}	20,0 ^a	5,1 ^{ab}	8,2 ^{a-d}	37,5 ^a	22,1 ^{abc}	5,1 ^{ab}	8,2 ^{a-d}	22,1 ^{abc}	38,2
SF (25)	40,8 ^f	26,0 ^{efg}	61,0 ^{a-d}	43,8 ^{a-e}	13,3 ^{ab}	12,0 ^a	52,4 ^{a-d}	20,6 ^{ab}	7,3 ^{a-d}	8,3 ^{a-d}	47,2 ^{ab}	24,3 ^{a-d}	7,3 ^{a-d}	8,3 ^{a-d}	24,3 ^{a-d}	61,4
SF (50)	37,8 ^{ef}	33,0 ^{g-k}	53,2 ^{a-d}	47,3 ^{cde}	16,1 ^{ab}	13,2 ^{ab}	55,1 ^{a-d}	20,6 ^{ab}	10,0 ^{a-d}	12,2 ^{a-e}	45,6 ^{ab}	24,2 ^{a-d}	10,0 ^{a-d}	12,2 ^{a-e}	24,2 ^{a-d}	63,9
SF (150)	35,2 ^{c-f}	39,1 ^{ijk}	47,4 ^a	47,8 ^{de}	34,5 ^d	19,6 ^{bcd}	63,7 ^d	35,3 ^e	11,8 ^{bcd}	14,7 ^{a-e}	45,8 ^{ab}	22,6 ^{abc}	11,8 ^{bcd}	14,7 ^{a-e}	22,6 ^{abc}	81,5
SF (300)	40,4 ^f	40,4 ^{kl}	49,8 ^{a-d}	49,2 ^e	69,5 ^e	40,6 ^e	63,1 ^d	43,4 ^f	25,1 ^e	22,9 ^e	52,4 ^{ab}	29,6 ^{de}	25,1 ^e	22,9 ^e	29,6 ^{de}	135,0

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 2. Ohran jyvä- ja olkisatojen fosfori- ja typpitoisuudet vuosien 2015–2017 astiakoikeissa, mg g⁻¹. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Vuosi 2015						Vuosi 2016						Vuosi 2017					
	P			N			P			N			P			N		
	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet	jyvät	oljet
Kontrolli	2,5 ^{a-e}	0,5 ^{ab}	26,1 ^{ab}	17,6 ^{abc}	3,4 ^{abc}	0,8 ^{ab}	29,8 ^{abc}	24,7 ^d	2,8 ^{ab}	0,8 ^a	27,7 ^{ab}	21,0 ^d						
A (200)	2,2 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	25,1 ^{ab}	13,5 ^{abc}	3,4 ^{abc}	0,8 ^{ab}	30,6 ^{abc}	23,6 ^d	3,1 ^{ab}	0,7 ^a	27,0 ^{ab}	19,4 ^{cd}						
A (400)	2,2 ^{a-e}	0,3 ^{ab}	24,2 ^a	14,5 ^{abc}	3,6 ^{abc}	0,7 ^{ab}	31,2 ^{abc}	22,3 ^{bcd}	3,3 ^{ab}	0,8 ^a	27,7 ^{ab}	21,0 ^d						
B (200)	3,2 ^e	0,8 ^{ab}	27,0 ^{ab}	17,5 ^{abc}	3,9 ^{bc}	1,0 ^b	30,6 ^{abc}	23,7 ^d	3,0 ^{ab}	0,6 ^a	25,0 ^a	19,7 ^{cd}						
B (400)	3,1 ^{de}	0,7 ^{ab}	26,2 ^{ab}	15,9 ^{abc}	4,0 ^{bc}	0,9 ^b	30,2 ^{abc}	21,4 ^{bcd}	3,7 ^{ab}	1,1 ^a	27,8 ^{ab}	21,3 ^d						
C (200)	2,8 ^{a-e}	0,8 ^{ab}	26,3 ^{ab}	16,6 ^{abc}	3,6 ^{abc}	0,8 ^{ab}	29,9 ^{abc}	23,3 ^{cd}	3,2 ^{ab}	0,7 ^a	25,9 ^{ab}	20,0 ^{cd}						
C (400)	2,5 ^{a-e}	0,7 ^{ab}	26,2 ^{ab}	16,1 ^{abc}	3,7 ^{abc}	0,8 ^{ab}	29,6 ^{ab}	21,4 ^{bcd}	3,7 ^{ab}	0,8 ^a	27,0 ^{ab}	19,0 ^{bcd}						
D (200)	3,0 ^{b-e}	0,8 ^{ab}	28,6 ^{ab}	19,3 ^{bc}	3,4 ^{abc}	0,7 ^{ab}	29,2 ^{ab}	22,3 ^{bcd}	2,9 ^{ab}	0,8 ^a	26,5 ^{ab}	18,6 ^{bcd}						
D (400)	3,3 ^e	1,1 ^b	30,1 ^b	21,3 ^c	3,7 ^{bc}	1,0 ^b	29,8 ^{abc}	23,9 ^d	3,0 ^{ab}	0,8 ^a	26,1 ^{ab}	20,3 ^d						
E (200)	2,3 ^{a-e}	0,5 ^{ab}	24,3 ^a	13,2 ^{abc}	4,0 ^{bc}	1,0 ^b	29,3 ^{ab}	21,6 ^{bcd}	2,9 ^{ab}	0,6 ^a	26,3 ^{ab}	19,4 ^{cd}						
E (400)	2,5 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	24,7 ^a	12,2 ^{ab}	4,2 ^{bc}	1,1 ^b	30,6 ^{abc}	22,5 ^{bcd}	3,8 ^b	0,7 ^a	27,0 ^{ab}	18,2 ^{bcd}						
F (200)	2,5 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	26,1 ^{ab}	13,1 ^{abc}	3,4 ^{abc}	0,6 ^{ab}	28,7 ^{ab}	17,5 ^{ab}	3,2 ^{ab}	0,6 ^a	25,3 ^{ab}	15,7 ^{abc}						
F (400)	2,5 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	27,9 ^{ab}	11,6 ^{ab}	3,5 ^{abc}	0,8 ^{ab}	27,8 ^a	18,1 ^{abc}	3,3 ^{ab}	0,6 ^a	25,0 ^a	14,7 ^{ab}						
G (200)	2,6 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	26,3 ^{ab}	17,1 ^{abc}	3,1 ^{ab}	0,6 ^{ab}	29,3 ^{ab}	22,5 ^{bcd}	2,8 ^{ab}	0,9 ^a	26,2 ^{ab}	19,8 ^{cd}						
G (400)	2,4 ^{a-e}	0,3 ^a	25,3 ^{ab}	14,9 ^{abc}	3,3 ^{ab}	0,8 ^{ab}	28,0 ^a	24,7 ^d	2,9 ^{ab}	0,7 ^a	26,4 ^{ab}	18,6 ^{bcd}						
H (200)	2,5 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	26,3 ^{ab}	16,9 ^{abc}	3,3 ^{abc}	0,9 ^b	30,0 ^{abc}	23,6 ^{cd}	2,9 ^{ab}	0,8 ^a	25,4 ^{ab}	18,3 ^{bcd}						
H (400)	2,4 ^{a-e}	0,4 ^{ab}	25,0 ^{ab}	14,2 ^{abc}	3,5 ^{abc}	0,8 ^{ab}	30,3 ^{abc}	22,9 ^{bcd}	3,0 ^{ab}	0,7 ^a	26,1 ^{ab}	18,2 ^{a-d}						
I (200)	2,7 ^{a-e}	0,6 ^{ab}	26,1 ^{ab}	14,3 ^{abc}	4,5 ^c	1,1 ^b	31,5 ^{bc}	25,8 ^d	3,5 ^{ab}	0,9 ^a	29,0 ^b	21,8 ^d						
I (400)	2,4 ^{a-e}	0,6 ^{ab}	26,1 ^{ab}	11,7 ^{ab}	3,7 ^{abc}	0,9 ^b	33,1 ^c	24,5 ^d	3,0 ^{ab}	0,5 ^a	27,4 ^{ab}	19,5 ^{cd}						
J (200) + SF (25)	2,0 ^{ab}	0,3 ^a	24,0 ^a	12,3 ^{ab}	4,0 ^{bc}	1,0 ^b	30,9 ^{abc}	24,4 ^d	3,2 ^{ab}	0,9 ^a	26,8 ^{ab}	20,2 ^d						
K (200) + SF (25)	2,0 ^{abc}	0,5 ^{ab}	25,1 ^{ab}	13,5 ^{abc}	3,6 ^{abc}	0,8 ^{ab}	30,8 ^{abc}	25,1 ^d	2,4 ^a	0,8 ^a	26,3 ^{ab}	20,1 ^{cd}						
SF (10)	2,1 ^{a-d}	0,5 ^{ab}	27,1 ^{ab}	19,1 ^{bc}	3,2 ^{ab}	0,7 ^{ab}	30,6 ^{abc}	23,5 ^{cd}	2,8 ^{ab}	0,8 ^a	25,7 ^{ab}	19,7 ^{cd}						
SF (25)	1,9 ^a	0,4 ^{ab}	23,5 ^a	13,0 ^{abc}	3,2 ^{ab}	0,7 ^{ab}	29,9 ^{abc}	23,3 ^{cd}	3,3 ^{ab}	0,8 ^a	25,9 ^{ab}	19,9 ^{cd}						
SF (50)	2,2 ^{a-e}	0,5 ^{ab}	26,0 ^{ab}	14,4 ^{abc}	3,5 ^{abc}	0,8 ^{ab}	30,2 ^{abc}	22,7 ^{bcd}	3,5 ^{ab}	0,9 ^a	27,7 ^{ab}	19,5 ^{cd}						
SF (150)	2,5 ^{a-e}	0,5 ^{ab}	28,3 ^{ab}	13,0 ^{abc}	3,4 ^{abc}	0,6 ^{ab}	29,7 ^{abc}	20,7 ^{bcd}	3,8 ^b	1,0 ^a	27,3 ^{ab}	19,3 ^{cd}						
SF (300)	3,1 ^{cde}	0,6 ^{ab}	28,2 ^{ab}	9,9 ^a	2,5 ^a	0,4 ^a	28,1 ^{ab}	13,4 ^a	3,5 ^{ab}	0,8 ^a	25,7 ^{ab}	13,7 ^a						

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 3. Ohran jyvä- ja olkisatojen kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2015. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Ca		Mg		K		S		Fe		Mn		Zn		Cu		Mo	
	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki
Kontrolli	0,3 ^{a-c}	6,5 ^{ab}	1,2 ^a	1,5 ^{ab}	9,1 ^{de}	59 ^{ef}	1,8 ^c	5,4 ^{fg}	47 ^{a-f}	37 ^{abc}	14 ^{ab}	81 ^{a-d}	68 ^{a-d}	90 ^{d-g}	5,8 ^{c-f}	4,3 ^{cde}	1,9 ^{cde}	4,2 ^{bcd}
A (200)	0,4 ^{a-e}	8,5 ^{abc}	1,2 ^a	1,5 ^{abc}	6,8 ^{a-d}	59 ^{ef}	1,7 ^{bc}	4,2 ^{b-g}	50 ^{a-f}	34 ^a	16 ^{abc}	79 ^{abc}	69 ^{a-d}	70 ^{a-g}	6,1 ^{c-f}	3,3 ^{a-e}	1,5 ^{a-d}	4,2 ^{bcd}
A (400)	0,3 ^{a-d}	9,4 ^{a-e}	1,2 ^a	1,7 ^{a-d}	5,7 ^a	52 ^{def}	1,6 ^{abc}	3,8 ^{b-f}	44 ^{a-e}	34 ^{ab}	16 ^{abc}	98 ^{a-d}	72 ^{a-d}	77 ^{b-g}	5,8 ^{c-f}	2,8 ^{a-e}	1,4 ^{abc}	2,6 ^{a-d}
B (200)	0,3 ^{a-d}	9,6 ^{a-e}	1,2 ^a	2,0 ^{b-e}	8,7 ^{cde}	52 ^{def}	1,6 ^{abc}	4,7 ^{efg}	47 ^{a-f}	44 ^{abc}	15 ^{abc}	81 ^{a-d}	73 ^{a-d}	95 ^{efg}	5,7 ^{a-f}	4,1 ^{cde}	1,8 ^{cde}	4,3 ^{cd}
B (400)	0,4 ^{a-e}	11,3 ^{a-e}	1,2 ^a	1,9 ^{a-e}	7,7 ^{a-e}	47 ^{c-f}	1,6 ^{abc}	3,9 ^{a-f}	47 ^{a-f}	40 ^{abc}	16 ^{abc}	73 ^{abc}	73 ^{a-d}	77 ^{b-g}	6,1 ^{c-f}	3,8 ^{a-e}	1,9 ^{cde}	4,3 ^{bcd}
C (200)	0,4 ^{a-e}	10,9 ^{a-e}	1,2 ^a	2,0 ^{b-e}	7,4 ^{a-e}	47 ^{c-f}	1,6 ^{abc}	5,9 ^g	50 ^{a-f}	40 ^{abc}	18 ^{bcd}	121 ^{cde}	68 ^{a-d}	85 ^{c-g}	6,3 ^{def}	4,2 ^{cde}	1,3 ^{abc}	3,2 ^{a-d}
C (400)	0,4 ^{b-e}	11,1 ^{a-e}	1,1 ^a	1,8 ^{a-e}	7,3 ^{a-e}	49 ^{c-f}	1,5 ^{ab}	4,9 ^{efg}	47 ^{a-f}	41 ^{abc}	22 ^{def}	137 ^{de}	67 ^{a-d}	82 ^{c-g}	6,3 ^{ef}	3,9 ^{b-e}	0,9 ^a	1,6 ^a
D (200)	0,4 ^{a-e}	10,5 ^{a-e}	1,1 ^a	2,0 ^{b-e}	9,4 ^e	55 ^{def}	1,7 ^{abc}	5,3 ^{fg}	41 ^{abc}	43 ^{abc}	17 ^{abc}	102 ^{abcd}	71 ^{a-d}	96 ^{efg}	6,4 ^{ef}	4,6 ^{de}	1,4 ^{abc}	2,8 ^{a-d}
D (400)	0,4 ^{a-e}	12,9 ^{b-f}	1,1 ^a	2,1 ^{b-e}	8,6 ^{cde}	50 ^{c-f}	1,7 ^{bc}	4,2 ^{b-g}	56 ^{def}	44 ^{abc}	19 ^{cde}	115 ^{de}	81 ^{cde}	97 ^{fg}	6,6 ^f	4,7 ^e	1,3 ^{abc}	2,2 ^{abc}
E (200)	0,4 ^{a-e}	7,8 ^{abc}	1,1 ^a	1,6 ^{a-d}	6,4 ^{abc}	48 ^{c-f}	1,4 ^a	3,1 ^{a-e}	42 ^{a-d}	35 ^{ab}	16 ^{abc}	69 ^{abc}	59 ^{ab}	57 ^{e-f}	5,3 ^{b-e}	3,0 ^{a-e}	1,7 ^{b-e}	3,4 ^{a-d}
E (400)	0,4 ^{a-e}	9,6 ^{a-e}	1,2 ^a	1,8 ^{a-e}	6,9 ^{a-e}	51 ^{c-f}	1,6 ^{abc}	2,5 ^{a-d}	53 ^{c-f}	40 ^{abc}	17 ^{abc}	78 ^{abc}	72 ^{a-d}	68 ^{e-f}	5,7 ^{a-f}	2,9 ^{a-e}	1,8 ^{cde}	3,4 ^{a-d}
F (200)	0,5 ^{de}	16,7 ^{def}	1,2 ^a	1,9 ^{a-e}	6,4 ^{abc}	40 ^{bcd}	1,7 ^{bc}	2,1 ^a	60 ^f	42 ^{abc}	15 ^{abc}	62 ^{ab}	74 ^{a-d}	56 ^{a-f}	5,4 ^{b-f}	2,5 ^{abc}	1,7 ^{cde}	2,4 ^{a-d}
F (400)	0,5 ^e	15,6 ^{c-f}	1,2 ^a	2,4 ^e	5,7 ^a	36 ^{bc}	1,7 ^{bc}	2,0 ^a	55 ^{c-f}	42 ^{abc}	16 ^{abc}	63 ^{ab}	73 ^{a-d}	52 ^{a-f}	5,3 ^{b-e}	2,6 ^{a-d}	1,5 ^{a-d}	1,4 ^a
G (200)	0,3 ^{a-d}	7,7 ^{ab}	1,2 ^a	1,9 ^{a-e}	8,3 ^{b-e}	60 ^{ef}	1,7 ^{abc}	5,6 ^{fg}	47 ^{a-f}	35 ^{ab}	15 ^{abc}	76 ^{abc}	66 ^{a-d}	84 ^{c-g}	5,6 ^{b-f}	3,7 ^{a-e}	1,5 ^{a-d}	4,3 ^{bcd}
G (400)	0,3 ^{a-d}	8,2 ^{abc}	1,2 ^a	1,8 ^{a-e}	7,2 ^{a-e}	60 ^f	1,6 ^{abc}	5,3 ^{fg}	41 ^{abc}	37 ^{abc}	15 ^{ab}	65 ^{ab}	64 ^{a-d}	73 ^{a-g}	5,8 ^{c-f}	3,7 ^{a-e}	1,8 ^{cde}	4,9 ^d
H (200)	0,3 ^{a-d}	7,6 ^{ab}	1,2 ^a	1,7 ^{a-d}	9,0 ^{de}	59 ^{ef}	1,7 ^{bc}	4,4 ^{d-g}	52 ^{b-f}	38 ^{abc}	23 ^{ef}	203 ^{fg}	80 ^{b-e}	115 ^g	6,1 ^{cdef}	3,9 ^{a-e}	1,0 ^{ab}	1,7 ^{ab}
H (400)	0,3 ^{a-d}	5,4 ^{ab}	1,2 ^a	1,2 ^a	7,8 ^{a-e}	49 ^{c-f}	1,7 ^{bc}	4,1 ^{b-g}	53 ^{c-f}	30 ^a	22 ^{def}	163 ^{ef}	83 ^{de}	86 ^{c-g}	6,4 ^{ef}	3,2 ^{a-e}	1,3 ^{abc}	2,5 ^{a-d}
I (200)	0,3 ^{ab}	4,4 ^a	1,2 ^a	1,8 ^{a-e}	6,7 ^{a-d}	28 ^b	1,7 ^{bc}	8,8 ^h	52 ^{b-f}	52 ^c	26 ^f	227 ^g	97 ^e	220 ^h	5,8 ^{c-f}	4,3 ^{cde}	1,7 ^{b-e}	7,9 ^e
I (400)	0,2 ^a	3,8 ^a	1,1 ^a	1,7 ^{a-e}	5,9 ^{ab}	10 ^a	1,7 ^{bc}	5,4 ^{fg}	53 ^{c-f}	50 ^{bc}	25 ^f	170 ^{ef}	100 ^e	195 ^h	6,3 ^{ef}	4,0 ^{b-e}	2,3 ^e	8,9 ^e
J	0,3 ^{abc}	10,2 ^{a-e}	1,1 ^a	1,7 ^{a-d}	6,3 ^{abc}	46 ^{c-f}	1,4 ^a	3,2 ^{a-e}	38 ^{ab}	35 ^{ab}	14 ^{ab}	49 ^a	59 ^{abc}	47 ^{a-d}	5,0 ^{a-d}	2,6 ^{a-d}	1,6 ^{b-e}	3,7 ^{a-d}
K	0,3 ^{abc}	7,9 ^{abc}	1,1 ^a	1,7 ^{a-d}	6,3 ^{abc}	46 ^{c-f}	1,5 ^{ab}	4,3 ^{c-g}	43 ^{a-e}	45 ^{abc}	15 ^{abc}	79 ^{abc}	63 ^{a-d}	85 ^{c-g}	5,2 ^{b-e}	3,9 ^{b-e}	1,9 ^{cde}	4,2 ^{bcd}
SF (10)	0,4 ^{a-e}	9,2 ^{a-d}	1,0 ^a	2,0 ^{b-e}	8,3 ^{b-e}	49 ^{c-f}	1,5 ^{ab}	4,3 ^{c-g}	43 ^{a-e}	45 ^{abc}	13 ^{ab}	79 ^{abc}	62 ^{a-d}	85 ^{c-g}	5,3 ^{b-e}	3,9 ^{b-e}	1,7 ^{cde}	4,2 ^{bcd}
SF (25)	0,3 ^{abc}	7,9 ^{abc}	1,1 ^a	1,6 ^{abc}	6,3 ^{abc}	49 ^{c-f}	1,5 ^{ab}	4,0 ^{b-g}	36 ^a	34 ^{ab}	13 ^a	49 ^a	53 ^a	42 ^{abc}	4,9 ^{abc}	2,4 ^{abc}	1,8 ^{cde}	3,9 ^{a-d}
SF (50)	0,3 ^{a-d}	10,4 ^{a-e}	1,2 ^a	2,0 ^{b-e}	5,8 ^{ab}	45 ^{cde}	1,6 ^{abc}	3,3 ^{a-e}	44 ^{a-e}	42 ^{abc}	13 ^{ab}	52 ^a	60 ^{abc}	41 ^{abc}	4,9 ^{abc}	2,6 ^{a-d}	2,1 ^{de}	3,6 ^{a-d}
SF (150)	0,5 ^{cde}	20,6 ^f	1,1 ^a	2,2 ^{cde}	5,5 ^a	36 ^{bc}	1,6 ^{abc}	2,4 ^{abc}	54 ^{c-f}	44 ^{abc}	14 ^{ab}	55 ^a	65 ^{a-d}	32 ^{ab}	4,3 ^{ab}	1,9 ^{ab}	1,8 ^{cde}	2,3 ^{abc}
SF (300)	0,5 ^{b-e}	17,2 ^{ef}	1,2 ^a	2,3 ^{de}	5,4 ^a	36 ^{bc}	1,6 ^{abc}	2,4 ^{ab}	57 ^{ef}	45 ^{abc}	15 ^{abc}	56 ^a	64 ^{a-d}	27 ^a	3,9 ^a	1,8 ^a	1,5 ^{a-d}	1,6 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovakka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovakka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 4. Ohran jyvä- ja olkisatojen kalsium (Ca)-, magnesiumium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Ca		Mg		K		S		Fe		Mn		Zn		Cu		Mo	
	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki
Kontrolli	0,9 ^a	13,0 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	1,7 ^{abc}	12,8 ^e	83 ^j	2,1 ^{bc}	5,0 ^a	52 ^f	60 ^a	20 ^{abc}	89 ^a	87 ^{bcd}	101 ^{ab}	8,0 ^{bc}	6,3 ^{bcd}	1,7 ^{a-d}	7,1 ^{ab}
A (200)	1,1 ^a	15,5 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	1,9 ^{a-d}	13,3 ^e	79 ^{bij}	2,1 ^{bc}	4,9 ^a	47 ^{c-f}	60 ^a	22 ^{a-d}	112 ^{ab}	83 ^{bcd}	93 ^{ab}	7,7 ^{bc}	5,7 ^{a-d}	1,8 ^{a-d}	5,7 ^a
A (400)	1,1 ^a	16,9 ^{cd}	1,3 ^{abc}	2,0 ^{a-d}	13,3 ^e	81 ^{ij}	2,0 ^{bc}	4,6 ^a	45 ^{b-f}	55 ^a	23 ^{b-d}	136 ^{abc}	83 ^{bcd}	104 ^{ab}	8,0 ^c	5,3 ^{abc}	1,7 ^{a-d}	5,1 ^a
B (200)	0,8 ^a	14,3 ^{a-d}	1,4 ^{abc}	2,1 ^{a-d}	13,0 ^e	72 ^{e-i}	2,1 ^{bc}	5,3 ^a	33 ^{abc}	60 ^a	26 ^{bcd}	140 ^{abc}	101 ^{de}	130 ^{ab}	8,1 ^c	6,3 ^{bcd}	1,2 ^a	3,7 ^a
B (400)	0,9 ^a	14,1 ^{a-d}	1,4 ^{abc}	2,2 ^{a-d}	12,1 ^{cde}	70 ^{e-h}	2,1 ^{bc}	4,9 ^a	37 ^{a-e}	48 ^a	25 ^{bcd}	137 ^{abc}	97 ^{cde}	118 ^{ab}	8,2 ^c	5,9 ^{a-d}	1,6 ^{abc}	5,7 ^a
C (200)	1,1 ^a	19,2 ^{cd}	1,2 ^{abc}	2,5 ^{a-d}	12,4 ^{de}	76 ^{f-j}	2,0 ^{bc}	5,2 ^a	45 ^{b-f}	56 ^a	22 ^{a-d}	138 ^{abc}	84 ^{bcd}	107 ^{ab}	7,8 ^{bc}	5,8 ^{a-d}	1,5 ^{abc}	4,2 ^a
C (400)	1,0 ^a	18,7 ^{cd}	1,3 ^{abc}	2,4 ^{a-d}	11,5 ^{cde}	69 ^{d-g}	1,9 ^{abc}	4,7 ^a	42 ^{a-f}	54 ^a	24 ^{bcd}	161 ^{abc}	84 ^{bcd}	98 ^{ab}	7,7 ^{bc}	5,5 ^{a-d}	1,9 ^{a-d}	5,1 ^a
D (200)	0,7 ^a	16,8 ^{cd}	1,3 ^{abc}	2,1 ^{a-d}	12,2 ^{de}	73 ^{e-j}	2,0 ^{bc}	5,8 ^a	39 ^{a-f}	52 ^a	22 ^{bcd}	146 ^{abc}	92 ^{cde}	117 ^{ab}	7,4 ^{abc}	5,0 ^{ab}	1,4 ^{ab}	5,5 ^a
D (400)	1,1 ^a	16,3 ^{cd}	1,4 ^{abc}	2,1 ^{a-d}	12,3 ^{de}	70 ^{e-h}	2,1 ^{bc}	5,1 ^a	50 ^{ef}	55 ^a	26 ^{cd}	141 ^{abc}	97 ^{cde}	119 ^{ab}	7,8 ^{bc}	6,0 ^{bcd}	1,4 ^{abc}	4,7 ^a
E (200)	0,7 ^a	14,7 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	2,2 ^{a-d}	12,6 ^e	69 ^{d-g}	2,0 ^{bc}	5,3 ^a	44 ^{a-f}	47 ^a	22 ^{bcd}	135 ^{abc}	83 ^{bcd}	108 ^{ab}	7,7 ^{bc}	6,1 ^{bcd}	2,7 ^{de}	7,3 ^{ab}
E (400)	1,1 ^a	15,7 ^{bcd}	1,4 ^{bc}	2,5 ^{a-d}	12,7 ^e	67 ^{def}	2,0 ^{bc}	4,6 ^a	36 ^{a-e}	51 ^a	27 ^d	180 ^{bc}	94 ^{cde}	135 ^{ab}	8,0 ^c	5,6 ^{a-d}	2,4 ^{b-e}	5,9 ^a
F (200)	0,5 ^a	13,0 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	2,2 ^{a-d}	11,6 ^{cde}	64 ^{cde}	1,9 ^{abc}	5,7 ^a	33 ^{abc}	54 ^a	21 ^{abc}	148 ^{abc}	76 ^{abc}	88 ^{ab}	7,0 ^{abc}	4,8 ^{ab}	2,0 ^{a-d}	6,5 ^a
F (400)	0,5 ^a	18,9 ^{cd}	1,4 ^{abc}	3,0 ^d	10,4 ^{bcd}	59 ^d	1,8 ^{abc}	6,5 ^a	34 ^{a-d}	47 ^a	22 ^{bcd}	200 ^c	82 ^{bcd}	112 ^{ab}	6,1 ^{ab}	4,1 ^{ab}	2,2 ^{a-d}	7,8 ^{ab}
G (200)	0,8 ^a	14,9 ^{a-d}	1,2 ^{ab}	1,7 ^{abc}	12,2 ^{de}	78 ^{g-j}	1,9 ^{abc}	5,0 ^a	40 ^{a-f}	54 ^a	21 ^{abc}	96 ^a	85 ^{bcd}	94 ^{ab}	7,9 ^{bc}	5,8 ^{a-d}	1,3 ^a	5,6 ^a
G (400)	1,1 ^a	14,1 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	1,8 ^{abc}	12,9 ^e	76 ^{f-j}	1,9 ^{abc}	4,7 ^a	42 ^{a-f}	58 ^a	21 ^{a-d}	104 ^{ab}	85 ^{bcd}	108 ^{ab}	7,9 ^{bc}	5,8 ^{a-d}	1,6 ^{abc}	5,6 ^a
H (200)	0,8 ^a	11,0 ^{abc}	1,2 ^{ab}	1,6 ^{ab}	12,5 ^e	70 ^{e-h}	1,9 ^{abc}	4,2 ^a	31 ^{ab}	44 ^a	23 ^{bcd}	103 ^a	84 ^{bcd}	92 ^{ab}	7,6 ^{bc}	5,4 ^{abc}	1,8 ^{a-d}	6,0 ^a
H (400)	1,1 ^a	14,3 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	1,9 ^{a-d}	13,1 ^e	72 ^{e-j}	2,0 ^{bc}	4,9 ^a	37 ^{a-e}	54 ^a	23 ^{bcd}	119 ^{ab}	79 ^{abc}	86 ^{ab}	7,8 ^{bc}	5,9 ^{a-d}	2,2 ^{a-d}	8,0 ^{abc}
I (200)	0,5 ^a	7,4 ^a	1,5 ^c	2,2 ^{a-d}	12,2 ^{de}	44 ^b	2,2 ^c	7,3 ^{ab}	48 ^{def}	61 ^a	26 ^d	158 ^{abc}	102 ^{de}	182 ^b	7,4 ^{abc}	8,1 ^d	2,5 ^{cde}	11,7 ^{bc}
I (400)	0,3 ^a	7,5 ^{ab}	1,3 ^{abc}	2,7 ^{bcd}	10,1 ^{bc}	34 ^a	2,2 ^c	10,4 ^b	48 ^{c-f}	66 ^a	27 ^d	306 ^d	112 ^e	441 ^c	6,4 ^{abc}	7,8 ^{cd}	6,2 ^f	29,8 ^e
J	0,8 ^a	17,9 ^{cd}	1,3 ^{abc}	2,4 ^{a-d}	12,8 ^e	69 ^{e-h}	2,0 ^{bc}	5,3 ^a	41 ^{a-f}	51 ^a	22 ^{bcd}	127 ^{abc}	86 ^{bcd}	106 ^{ab}	8,1 ^c	6,0 ^{bcd}	1,8 ^{a-d}	6,2 ^a
K	2,2 ^b	21,0 ^d	1,4 ^{abc}	2,6 ^{a-d}	12,4 ^{de}	75 ^{f-j}	2,0 ^{bc}	4,7 ^a	41 ^{a-f}	49 ^a	20 ^{abc}	90 ^a	84 ^{bcd}	88 ^{ab}	8,0 ^{bc}	5,4 ^{abc}	1,7 ^{a-d}	6,2 ^a
SF (10)	0,7 ^a	12,2 ^{abc}	1,2 ^a	1,5 ^a	12,8 ^e	76 ^{f-j}	2,0 ^{bc}	4,9 ^a	32 ^{ab}	49 ^a	20 ^{ab}	98 ^a	84 ^{bcd}	102 ^{ab}	7,6 ^{abc}	5,8 ^{a-d}	1,7 ^{a-d}	6,5 ^a
SF (25)	0,9 ^a	13,9 ^{a-d}	1,2 ^{ab}	1,7 ^{abc}	12,5 ^e	77 ^{g-j}	1,9 ^{abc}	4,7 ^a	30 ^a	49 ^a	20 ^{abc}	101 ^a	83 ^{bcd}	103 ^{ab}	7,4 ^{abc}	6,2 ^{bcd}	1,5 ^{abc}	5,1 ^a
SF (50)	0,7 ^a	11,5 ^{abc}	1,2 ^a	1,6 ^{abc}	12,2 ^{de}	73 ^{e-j}	2,0 ^{bc}	5,1 ^a	39 ^{a-f}	52 ^a	21 ^{a-d}	110 ^{ab}	82 ^{a-d}	106 ^{ab}	7,4 ^{abc}	5,9 ^{a-d}	1,7 ^{a-d}	5,7 ^a
SF (150)	0,6 ^a	15,4 ^{a-d}	1,3 ^{abc}	2,2 ^{a-d}	9,2 ^b	70 ^{e-h}	1,7 ^{ab}	5,6 ^a	34 ^{a-d}	55 ^a	20 ^{abc}	152 ^{abc}	71 ^{ab}	99 ^{ab}	6,4 ^{abc}	5,0 ^{ab}	3,4 ^{de}	13,1 ^c
SF (300)	0,4 ^a	16,5 ^{cd}	1,3 ^{abc}	2,8 ^{cd}	6,3 ^a	55 ^c	1,5 ^a	5,9 ^a	40 ^{a-f}	49 ^a	16 ^a	137 ^{abc}	60 ^a	68 ^a	5,7 ^a	3,3 ^a	5,3 ^f	19,6 ^d

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 5. Ohran jyvä- ja olkisatojen kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2017. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Ca		Mg		K		S		Fe		Mn		Zn		Cu		Mo	
	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki	jyvä	olki
Kontrolli	0,6 ^a	13,8 ^{b-e}	1,2 ^{ab}	2,1 ^{abc}	16,0 ^d	59 ^{cde}	2,0 ^a	6,5 ^{cd}	48 ^d	49 ^b	17 ^a	183 ^{ab}	59 ^a	79 ^{abc}	6,8 ^a	6,1 ^b	2,0 ^a	8,9 ^{ab}
A (200)	0,6 ^a	13,9 ^{b-e}	1,3 ^{ab}	1,8 ^a	14,4 ^{bcd}	59 ^{cde}	2,0 ^a	4,9 ^{a-d}	40 ^{bcd}	33 ^{ab}	21 ^{a-d}	182 ^{ab}	68 ^{ab}	77 ^{abc}	6,3 ^a	4,8 ^{ab}	2,1 ^a	7,2 ^{ab}
A (400)	1,7 ^a	18,4 ^{de}	1,4 ^{abc}	2,6 ^{abc}	14,6 ^{bcd}	66 ^{de}	2,0 ^a	4,7 ^{a-d}	29 ^{a-d}	31 ^{ab}	23 ^{a-d}	164 ^{ab}	71 ^{ab}	73 ^{abc}	7,0 ^a	5,3 ^{ab}	1,9 ^a	7,0 ^{ab}
B (200)	0,8 ^a	19,2 ^e	1,4 ^{abc}	2,0 ^{abc}	14,8 ^{bcd}	48 ^{bc}	1,9 ^a	5,0 ^{a-d}	17 ^{ab}	33 ^{ab}	19 ^{a-d}	171 ^{ab}	60 ^{ab}	67 ^a	6,0 ^a	4,3 ^{ab}	1,7 ^a	5,3 ^a
B (400)	1,9 ^a	18,6 ^e	1,7 ^c	3,0 ^c	15,3 ^{cd}	64 ^{cde}	2,1 ^{ab}	5,1 ^{a-d}	17 ^{ab}	30 ^{ab}	24 ^{a-d}	159 ^{ab}	79 ^{ab}	94 ^{abc}	7,7 ^a	5,8 ^{ab}	1,8 ^a	6,1 ^{ab}
C (200)	1,2 ^a	15,9 ^{cde}	1,4 ^{abc}	2,1 ^{abc}	13,3 ^{a-d}	64 ^{cde}	1,8 ^a	4,7 ^{abc}	30 ^{a-d}	25 ^a	21 ^{a-d}	131 ^a	63 ^{ab}	60 ^a	6,8 ^a	4,4 ^{ab}	1,9 ^a	7,1 ^{ab}
C (400)	0,6 ^a	19,2 ^e	1,4 ^{abc}	2,2 ^{abc}	14,4 ^{bcd}	61 ^{cde}	1,8 ^a	5,3 ^{a-d}	32 ^{a-d}	40 ^{ab}	23 ^{a-d}	264 ^c	79 ^{ab}	120 ^{bcd}	6,7 ^a	5,2 ^{ab}	1,8 ^a	6,1 ^{ab}
D (200)	0,7 ^a	14,3 ^{b-e}	1,3 ^{ab}	2,0 ^{ab}	14,4 ^{a-d}	60 ^{cde}	1,8 ^a	4,5 ^{abc}	18 ^{abc}	27 ^a	20 ^{ab}	168 ^{abc}	67 ^{ab}	69 ^{ab}	6,6 ^a	4,5 ^{ab}	2,0 ^a	6,9 ^{ab}
D (400)	0,7 ^a	16,8 ^{cde}	1,3 ^{ab}	2,0 ^{abc}	13,5 ^{a-d}	53 ^{bcd}	1,7 ^a	4,7 ^{a-d}	41 ^{bcd}	42 ^{ab}	18 ^{abc}	191 ^{abc}	62 ^{ab}	77 ^{abc}	6,2 ^a	4,7 ^{ab}	2,0 ^a	6,4 ^{ab}
E (200)	0,8 ^a	14,6 ^{b-e}	1,3 ^{ab}	2,0 ^{abc}	13,3 ^{a-d}	68 ^{de}	1,8 ^a	5,0 ^{a-d}	31 ^{a-d}	31 ^{ab}	23 ^{a-d}	177 ^{ab}	69 ^{ab}	78 ^{abc}	6,7 ^a	5,0 ^{ab}	1,9 ^a	7,5 ^{ab}
E (400)	0,6 ^a	15,8 ^{cde}	1,5 ^{abc}	2,4 ^{abc}	14,1 ^{bcd}	60 ^{cde}	1,9 ^a	5,4 ^{a-d}	26 ^{a-d}	37 ^{ab}	26 ^d	290 ^c	82 ^{ab}	124 ^{cd}	6,6 ^a	5,2 ^{ab}	2,2 ^a	8,1 ^{ab}
F (200)	0,6 ^a	9,7 ^{abc}	1,4 ^{abc}	2,3 ^{abc}	12,3 ^{abc}	68 ^{de}	2,0 ^a	5,8 ^{a-d}	23 ^{a-d}	36 ^{ab}	22 ^{a-d}	139 ^a	65 ^{ab}	72 ^{ab}	7,3 ^a	5,3 ^{ab}	1,9 ^a	7,9 ^{ab}
F (400)	0,5 ^a	12,9 ^{a-e}	1,5 ^{bc}	2,9 ^{bc}	10,5 ^a	64 ^{cde}	1,8 ^a	4,7 ^{a-d}	25 ^{a-d}	31 ^{ab}	24 ^{bcd}	215 ^{abc}	75 ^{ab}	104 ^{abc}	7,0 ^a	4,4 ^{ab}	2,2 ^a	7,7 ^{ab}
G (200)	0,7 ^a	15,4 ^{b-e}	1,3 ^{ab}	1,9 ^a	13,6 ^{a-d}	52 ^{bcd}	1,8 ^a	4,7 ^{a-d}	23 ^{a-d}	30 ^{ab}	18 ^{abc}	196 ^{abc}	59 ^a	68 ^a	5,7 ^a	4,8 ^{ab}	1,8 ^a	5,5 ^{ab}
G (400)	0,8 ^a	14,2 ^{b-e}	1,4 ^{abc}	1,9 ^a	13,8 ^{a-d}	61 ^{cde}	1,9 ^a	4,0 ^a	15 ^{ab}	30 ^{ab}	18 ^{ab}	159 ^{ab}	66 ^{ab}	72 ^{ab}	6,6 ^a	4,3 ^{ab}	1,9 ^a	6,3 ^{ab}
H (200)	0,7 ^a	13,3 ^{a-e}	1,3 ^{ab}	1,7 ^a	14,5 ^{bcd}	56 ^{cde}	2,0 ^a	4,2 ^{ab}	43 ^{cd}	33 ^{ab}	22 ^{a-d}	173 ^{ab}	68 ^{ab}	71 ^{ab}	6,2 ^a	4,4 ^{ab}	2,1 ^a	5,9 ^{ab}
H (400)	0,5 ^a	13,6 ^{b-e}	1,2 ^{ab}	1,7 ^a	11,7 ^{ab}	59 ^{cde}	1,9 ^a	5,0 ^{a-d}	23 ^{a-d}	35 ^{ab}	21 ^{a-d}	196 ^{abc}	72 ^{ab}	77 ^{abc}	6,0 ^a	5,2 ^{ab}	1,9 ^a	6,8 ^{ab}
I (200)	0,6 ^a	7,7 ^{ab}	1,4 ^{abc}	1,9 ^a	14,4 ^{a-d}	38 ^{ab}	2,1 ^{ab}	6,3 ^{cd}	32 ^{a-d}	27 ^a	26 ^{cd}	256 ^{bc}	83 ^{ab}	178 ^e	6,2 ^a	5,2 ^{ab}	2,5 ^a	8,5 ^{ab}
I (400)	0,5 ^a	5,4 ^a	1,3 ^{abc}	1,6 ^a	11,7 ^{ab}	28 ^a	2,4 ^b	6,8 ^d	20 ^{abc}	36 ^{ab}	26 ^{cd}	191 ^{abc}	86 ^b	158 ^{de}	5,9 ^a	4,1 ^a	2,6 ^a	10,2 ^b
J	0,8 ^a	14,7 ^{b-e}	1,2 ^{ab}	2,0 ^{ab}	14,5 ^{bcd}	71 ^e	2,0 ^a	5,4 ^{a-d}	24 ^{a-d}	40 ^{ab}	22 ^{a-d}	160 ^{ab}	68 ^{ab}	81 ^{abc}	7,3 ^a	5,8 ^{ab}	1,8 ^a	6,7 ^{ab}
K	0,9 ^a	15,7 ^{b-e}	1,2 ^a	2,4 ^{abc}	13,3 ^{a-d}	61 ^{cde}	1,8 ^a	6,3 ^{bcd}	13 ^a	42 ^{ab}	20 ^{a-d}	174 ^{ab}	61 ^{ab}	71 ^{abc}	6,1 ^a	5,4 ^{ab}	1,7 ^a	6,8 ^{ab}
SF (10)	1,1 ^a	13,8 ^{b-e}	1,3 ^{ab}	1,9 ^a	14,0 ^{a-d}	61 ^{cde}	2,0 ^a	4,1 ^a	18 ^{abc}	30 ^{ab}	21 ^{a-d}	141 ^a	66 ^{ab}	71 ^{ab}	6,6 ^a	4,7 ^{ab}	2,2 ^a	6,0 ^{ab}
SF (25)	1,3 ^a	15,8 ^{cde}	1,4 ^{abc}	2,1 ^{abc}	15,3 ^{cd}	57 ^{cde}	2,0 ^{ab}	5,0 ^{a-d}	17 ^{ab}	27 ^a	22 ^{a-d}	174 ^{ab}	70 ^{ab}	74 ^{abc}	6,6 ^a	4,7 ^{ab}	2,0 ^a	8,3 ^{ab}
SF (50)	0,9 ^a	14,1 ^{b-e}	1,4 ^{abc}	2,1 ^{abc}	14,9 ^{bcd}	66 ^{de}	2,0 ^{ab}	5,9 ^{a-d}	31 ^{a-d}	35 ^{ab}	20 ^{a-d}	169 ^{abc}	70 ^{ab}	90 ^{abc}	6,8 ^a	5,6 ^{ab}	2,5 ^a	9,5 ^{ab}
SF (150)	0,6 ^a	13,7 ^{b-e}	1,4 ^{abc}	2,0 ^{abc}	14,7 ^{bcd}	67 ^{de}	2,0 ^{ab}	5,3 ^{a-d}	37 ^{a-d}	36 ^{ab}	23 ^{a-d}	192 ^{abc}	69 ^{ab}	86 ^{abc}	6,7 ^a	5,2 ^{ab}	1,9 ^a	6,4 ^{ab}
SF (300)	0,5 ^a	10,5 ^{a-d}	1,4 ^{abc}	1,9 ^a	12,7 ^{a-d}	57 ^{cde}	1,9 ^a	5,2 ^{a-d}	40 ^{bcd}	33 ^{ab}	23 ^{a-d}	127 ^a	72 ^{ab}	86 ^{abc}	7,6 ^a	4,8 ^{ab}	2,5 ^a	9,9 ^{ab}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 6. Ohran jyvä- ja olkisatojen kadmium (Cd)-, lyijy (Pb)-, nikkeli (Ni)-, arseeni (As)- ja kromi (Cr)-pitoisuudet ($\mu\text{g kg}^{-1}$) vuosien 2015–2016 astiakoikeissa. Eri kirjaimilla merkityt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$). Vuoden 2015 olkisadossa muutaman rinnakkaisen As-pitoisuus alle määrittysrajan ($< 24 \mu\text{g kg}^{-1}$) samoin kuin vuoden 2016 jyvänäytteiden Ni- ja Cr-pitoisuudet ($< 54 \mu\text{g kg}^{-1}$) ja olkinäytteiden Pb- ($53 \mu\text{g kg}^{-1}$) ja Cr-pitoisuudet ($95 \mu\text{g kg}^{-1}$). Tällöin pitoisuutena käytettiin määrittysrajaa.

		Vuosi 2015						Vuosi 2016						
		jyväsaato			olkisato			jyväsaato			olkisato			
		Cd	Ni	Cd	Pb	Ni	As	Cd	Ni	Cr	Cd	Pb	Ni	Cr
Kontrolli		78 ^{ab}	52 ^{ab}	368 ^{a-d}	97 ^a	170 ^{abc}	30 ^{abc}	80 ^a	67 ^a	93 ^b	328 ^{ab}	64 ^a	229 ^a	185 ^{abc}
A (200)		82 ^{abc}	50 ^{ab}	373 ^{abcd}	95 ^a	170 ^{abc}	30 ^{abc}	77 ^a	82 ^a	63 ^{ab}	303 ^a	65 ^a	307 ^a	155 ^{abc}
A (400)		79 ^{ab}	41 ^{ab}	292 ^{abc}	74 ^a	159 ^{abc}	40 ^{a-d}	65 ^a	105 ^a	70 ^{ab}	292 ^a	52 ^a	264 ^a	134 ^{abc}
B (200)		113 ^{a-e}	47 ^{ab}	367 ^{abcd}	113 ^a	188 ^{abc}	50 ^{bcd}	97 ^{ab}	59 ^a	56 ^{ab}	392 ^{ab}	59 ^a	196 ^a	139 ^{abc}
B (400)		99 ^{a-d}	56 ^{ab}	295 ^{abc}	73 ^a	178 ^{abc}	38 ^{a-d}	100 ^{ab}	57 ^a	77 ^{ab}	382 ^{ab}	51 ^a	205 ^a	109 ^{abc}
C (200)		93 ^{a-d}	46 ^{ab}	325 ^{abcd}	77 ^a	179 ^{abc}	40 ^{a-d}	107 ^{ab}	71 ^a	67 ^{ab}	436 ^{ab}	67 ^a	240 ^a	117 ^{abc}
C (400)		80 ^{ab}	47 ^{ab}	331 ^{abcd}	111 ^a	186 ^{abc}	50 ^{cd}	146 ^{abc}	59 ^a	54 ^a	440 ^{ab}	64 ^a	269 ^a	147 ^{abc}
D (200)		99 ^{a-d}	50 ^{ab}	350 ^{abcd}	92 ^a	183 ^{abc}	37 ^{a-d}	87 ^{ab}	60 ^a	62 ^{ab}	415 ^{ab}	53 ^a	262 ^a	181 ^{abc}
D (400)		99 ^{a-d}	70 ^{ab}	358 ^{abcd}	96 ^a	216 ^{abcd}	41 ^{a-d}	82 ^a	93 ^a	73 ^{ab}	331 ^{ab}	65 ^a	216 ^a	116 ^{abc}
E (200)		113 ^{a-e}	54 ^{ab}	377 ^{abcd}	72 ^a	132 ^{ab}	35 ^{a-d}	212 ^c	54 ^a	54 ^a	407 ^{ab}	66 ^a	195 ^a	127 ^{abc}
E (400)		137 ^{de}	51 ^{ab}	447 ^{cd}	106 ^a	179 ^{abc}	40 ^{a-d}	175 ^{bc}	87 ^a	56 ^{ab}	459 ^{ab}	64 ^a	223 ^a	126 ^{abc}
F (200)		123 ^{b-e}	67 ^{ab}	340 ^{abcd}	92 ^a	234 ^{bcd}	38 ^{a-d}	76 ^a	73 ^a	62 ^{ab}	317 ^{ab}	53 ^a	302 ^a	98 ^a
F (400)		78 ^{ab}	71 ^{ab}	231 ^a	97 ^a	224 ^{abcd}	41 ^{a-d}	84 ^{ab}	60 ^a	53 ^a	399 ^{ab}	69 ^a	299 ^a	109 ^{abc}
G (200)		96 ^{a-d}	47 ^{ab}	332 ^{abcd}	108 ^a	164 ^{abc}	46 ^{a-d}	67 ^a	71 ^a	57 ^{ab}	304 ^{ab}	52 ^a	224 ^a	121 ^{abc}
G (400)		87 ^{abc}	43 ^{ab}	225 ^a	122 ^a	156 ^{abc}	44 ^{a-d}	66 ^a	75 ^a	68 ^{ab}	301 ^a	76 ^a	294 ^a	116 ^{abc}
H (200)		93 ^{a-d}	49 ^{ab}	338 ^{abcd}	87 ^a	150 ^{abc}	36 ^{a-d}	76 ^a	56 ^a	54 ^a	318 ^{ab}	52 ^a	145 ^a	98 ^a
H (400)		123 ^{b-e}	47 ^{ab}	285 ^{abc}	44 ^a	114 ^{ab}	27 ^a	78 ^a	66 ^a	71 ^{ab}	342 ^{ab}	65 ^a	227 ^a	139 ^{abc}
I (200)		90 ^{abc}	49 ^{ab}	497 ^d	93 ^a	114 ^{ab}	39 ^{a-d}	86 ^{ab}	65 ^a	96 ^b	443 ^{ab}	136 ^{ab}	144 ^a	176 ^{abc}
I (400)		71 ^a	56 ^{ab}	434 ^{bcd}	148 ^a	123 ^{ab}	50 ^{bcd}	123 ^{abc}	77 ^a	84 ^{ab}	891 ^c	205 ^b	199 ^a	178 ^{bc}
J (200) + SF (25)		104 ^{a-e}	40 ^a	315 ^{abc}	77 ^a	151 ^{abc}	34 ^{a-d}	87 ^{ab}	78 ^a	93 ^b	363 ^{ab}	66 ^a	299 ^a	163 ^{abc}
K (200) + SF (25)		112 ^{a-e}	47 ^{ab}	154 ^a	50 ^a	104 ^a	30 ^{abc}	78 ^a	98 ^a	90 ^{ab}	308 ^{ab}	62 ^a	293 ^a	173 ^{abc}
SF (10)		106 ^{a-e}	62 ^{ab}	392 ^{abcd}	105 ^a	149 ^{abc}	38 ^{a-d}	79 ^a	93 ^a	80 ^{ab}	352 ^{ab}	73 ^a	192 ^a	127 ^{abc}
SF (25)		84 ^{abc}	48 ^{ab}	268 ^{ab}	71 ^a	128 ^{ab}	29 ^{ab}	93 ^{ab}	75 ^a	86 ^{ab}	356 ^{ab}	67 ^a	210 ^a	100 ^{ab}
SF (50)		119 ^{b-e}	71 ^{ab}	330 ^{abcd}	71 ^a	170 ^{abc}	39 ^{a-d}	100 ^{ab}	67 ^a	81 ^{ab}	364 ^{ab}	51 ^a	197 ^a	114 ^{abc}
SF (150)		150 ^e	71 ^{ab}	370 ^{abcd}	106 ^a	327 ^d	42 ^{a-d}	112 ^{ab}	63 ^a	69 ^{ab}	492 ^b	73 ^a	274 ^a	151 ^{abc}
SF (300)		127 ^{cde}	100 ^b	317 ^{abc}	99 ^a	266 ^{cd}	52 ^d	111 ^{ab}	55 ^a	82 ^{ab}	404 ^{ab}	73 ^a	297 ^a	136 ^{abc}

*A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovakka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovakka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 7. Raiheinän sadot ($g\ astia^{-1}$) astiakokeissa vuosina 2015–2017. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$). Viimeistä niittoa (11. niitto) ei otettu kokonaissadoissa huomioon muutamien käsittelyjen kärsiessä typen puutoksesta.

	Vuosi 2015					Vuosi 2016					Vuosi 2017				
	1. niitto	2. niitto	3. niitto	4. niitto	Σ_{1-4}	5. niitto	6. niitto	7. niitto	8. niitto	Σ_{5-8}	9. niitto	10. niitto	11. niitto	Σ_{9-10}	Σ_{1-10}
Kontrolli	9,5 ^a	14,3 ^a	14,6 ^{ab}	8,5 ^a	46,9 ^a	1,6 ^a	5,3 ^a	5,6 ^a	3,5 ^a	15,9 ^a	<0,1	<0,1	0,5 ^a	<0,1	62,8 ^a
A (200)	14,6 ^{a-d}	16,3 ^{ab}	18,6 ^{b-e}	12,9 ^{a-e}	62,4 ^{a-e}	6,1 ^{a-d}	14,2 ^{a-d}	11,4 ^{a-d}	8,5 ^{a-e}	40,2 ^{a-d}	3,0 ^{ab}	3,7 ^{abc}	11,5 ^{abc}	6,7 ^{ab}	109,3 ^{a-d}
A (400)	20,0 ^{ef}	21,1 ^{ab}	21,7 ^{d-h}	15,0 ^{c-g}	77,8 ^{efg}	12,3 ^{c-g}	25,6 ^{fgh}	18,9 ^{c-h}	15,5 ^{e-j}	72,3 ^{e-i}	9,2 ^{a-d}	12,0 ^{a-g}	25,8 ^{c-f}	21,2 ^{a-e}	171,4 ^{efg}
B (200)	17,6 ^{b-f}	18,6 ^{ab}	20,0 ^{c-f}	15,6 ^{d-h}	71,7 ^{def}	12,2 ^{c-f}	25,0 ^{e-h}	21,5 ^{e-h}	16,7 ^{f-j}	75,4 ^{hij}	16,1 ^{bcd}	16,9 ^{f-j}	23,3 ^{c-f}	33,0 ^{d-g}	180,1 ^{fg}
B (400)	21,5 ^{efg}	17,4 ^{ab}	22,3 ^{d-h}	17,4 ^{e-i}	78,6 ^{efg}	16,6 ^{e-i}	30,2 ^{ghi}	23,1 ^{fgh}	17,2 ^{g-j}	87,0 ^{h-k}	12,6 ^{a-f}	19,3 ^{f-j}	31,6 ^f	31,9 ^{c-g}	197,5 ^{gh}
C (200)	21,1 ^{def}	18,4 ^{ab}	21,2 ^{d-g}	14,8 ^{c-g}	75,4 ^{def}	10,7 ^{a-e}	21,6 ^{d-g}	16,2 ^{b-g}	9,9 ^{a-g}	58,4 ^{deg}	8,4 ^{a-d}	15,9 ^{c-i}	29,6 ^{ef}	24,3 ^{a-f}	158,1 ^{efg}
C (400)	28,1 ^{ghi}	26,6 ^b	23,0 ^{e-h}	18,1 ^{f-j}	95,7 ^{ghij}	21,7 ^{g-j}	37,2 ^j	27,3 ^{hij}	19,1 ^{ij}	105,4 ^k	24,7 ^{efg}	28,4 ^{ij}	20,9 ^{c-f}	53,1 ^{gh}	254,2 ⁱ
D (200)	16,9 ^{b-e}	20,7 ^{ab}	21,2 ^{d-g}	14,2 ^{b-f}	72,9 ^{def}	7,5 ^{a-e}	16,5 ^{c-f}	16,9 ^{b-g}	11,0 ^{b-h}	51,9 ^{cd}	4,4 ^{ab}	7,6 ^{a-f}	19,2 ^{c-f}	12,0 ^{a-d}	136,8 ^{b-f}
D (400)	20,8 ^{def}	22,8 ^{ab}	23,1 ^{e-h}	16,1 ^{d-h}	82,7 ^{fgh}	14,0 ^{d-h}	24,7 ^{e-h}	20,1 ^{d-h}	14,4 ^{d-i}	73,3 ^{ghi}	9,7 ^{a-d}	14,4 ^{b-i}	23,2 ^{c-f}	24,1 ^{a-f}	180,1 ^{fg}
E (200)	22,5 ^{e-h}	17,1 ^{ab}	22,8 ^{d-h}	16,7 ^{e-i}	79,2 ^{efg}	12,0 ^{c-f}	22,6 ^{d-g}	20,8 ^{efgh}	16,0 ^{f-j}	71,3 ^{e-i}	9,2 ^{a-d}	11,8 ^{a-g}	20,7 ^{c-f}	21,0 ^{a-e}	171,5 ^{efg}
E (400)	33,5 ^{ij}	22,7 ^{ab}	26,9 ^{hi}	21,0 ^{ij}	104,0 ^j	22,3 ^{hij}	37,0 ^j	27,5 ^{hij}	16,6 ^{f-j}	103,5 ^{jk}	20,0 ^{def}	26,6 ^{hij}	21,5 ^{c-f}	46,6 ^{fgh}	254,1 ⁱ
F (200)	37,6 ^{jk}	20,0 ^{ab}	25,4 ^{ghi}	19,0 ^{g-j}	102,1 ^{ij}	26,3 ^j	34,6 ^{hi}	24,3 ^{ghi}	16,6 ^{f-j}	101,8 ^{jk}	19,1 ^{cdef}	18,5 ^{f-j}	20,5 ^{c-f}	37,6 ^{efg}	241,5 ^{hi}
F (400)	41,6 ^k	20,2 ^{ab}	25,9 ^{ghi}	18,5 ^{f-j}	106,2 ^j	43,6 ^k	50,7 ^j	33,9 ^j	22,2 ^j	150,4 ^l	35,2 ^g	26,5 ^{ij}	17,6 ^{b-f}	61,8 ^h	318,3 ^j
G (200)	12,4 ^{ab}	16,8 ^{ab}	17,5 ^{a-d}	11,7 ^{a-d}	58,4 ^{a-d}	5,0 ^{a-d}	13,1 ^{a-d}	10,3 ^{abc}	7,6 ^{a-d}	36,1 ^{a-g}	1,8 ^a	2,6 ^{ab}	11,3 ^{abc}	4,4 ^{ab}	98,8 ^{abc}
G (400)	16,1 ^{b-e}	20,5 ^{ab}	21,8 ^{d-h}	14,9 ^{c-g}	73,4 ^{def}	9,7 ^{a-e}	21,6 ^{d-g}	17,3 ^{b-g}	11,6 ^{c-h}	60,2 ^{d-h}	5,5 ^{abc}	10,5 ^{a-g}	23,9 ^{c-f}	16,0 ^{a-e}	149,6 ^{c-g}
H (200)	11,1 ^{ab}	14,9 ^a	15,7 ^{abc}	9,4 ^{ab}	51,1 ^{ab}	3,1 ^{abc}	9,7 ^{abc}	9,0 ^{ab}	5,9 ^{abc}	27,7 ^{bc}	2,9 ^a	4,9 ^{a-d}	13,3 ^{abc}	7,8 ^{ab}	86,5 ^{ab}
H (400)	13,3 ^{abc}	13,4 ^a	15,4 ^{abc}	10,6 ^{abc}	52,7 ^{abc}	5,9 ^{a-d}	15,4 ^{b-e}	13,2 ^{a-e}	9,7 ^{a-f}	44,2 ^{b-e}	3,2 ^{abc}	6,3 ^{a-e}	14,2 ^{a-e}	9,4 ^{abc}	106,4 ^{a-d}
I (200)	24,1 ^{fgh}	22,4 ^{ab}	22,4 ^{d-h}	15,7 ^{d-h}	84,5 ^{f-i}	11,7 ^{b-e}	23,0 ^{d-g}	20,1 ^{d-h}	15,1 ^{e-j}	70,0 ^{ehi}	8,5 ^{a-d}	12,2 ^{a-g}	19,8 ^{c-f}	20,7 ^{a-e}	175,2 ^{efg}
I (400)	27,9 ^{ghi}	16,4 ^{ab}	21,4 ^{d-g}	14,8 ^{c-g}	80,5 ^{efg}	25,1 ^{ij}	29,6 ^{ghi}	22,7 ^{fgh}	16,1 ^{f-j}	93,5 ^{ijk}	11,7 ^{a-e}	14,0 ^{b-h}	25,1 ^{c-f}	25,7 ^{b-f}	199,7 ^{gh}
J	20,2 ^{def}	15,2 ^a	20,0 ^{c-f}	14,4 ^{c-g}	69,9 ^{b-f}	6,6 ^{a-d}	14,2 ^{a-d}	14,4 ^{a-f}	10,1 ^{a-g}	45,3 ^{b-g}	3,8 ^{ab}	5,3 ^{a-d}	16,7 ^{a-f}	9,1 ^{abc}	124,3 ^{b-f}
K	19,1 ^{c-f}	16,4 ^{ab}	18,8 ^{b-e}	12,9 ^{a-e}	67,2 ^{b-f}	6,8 ^{a-d}	17,4 ^{c-f}	17,8 ^{b-g}	13,8 ^{d-i}	55,8 ^{c-g}	3,3 ^{ab}	5,5 ^{a-d}	14,7 ^{a-e}	8,7 ^{ab}	131,7 ^{b-f}
SF (10)	12,1 ^{ab}	11,6 ^a	13,1 ^a	8,5 ^a	45,3 ^a	2,4 ^{ab}	6,2 ^{ab}	5,5 ^a	4,0 ^{ab}	18,2 ^{ab}	0,8 ^a	0,8 ^a	2,0 ^{ab}	1,6 ^a	65,1 ^a
SF (25)	21,1 ^{def}	16,3 ^{ab}	19,9 ^{b-f}	13,0 ^{a-f}	70,3 ^{c-f}	4,4 ^{abc}	11,2 ^{abc}	10,2 ^{abc}	7,6 ^{a-d}	33,4 ^{a-d}	3,6 ^{ab}	5,5 ^{a-d}	12,7 ^{a-d}	9,1 ^{abc}	112,9 ^{a-d}
SF (50)	28,7 ^{hi}	13,5 ^a	19,8 ^{b-f}	14,3 ^{c-g}	76,3 ^{def}	8,1 ^{a-e}	16,8 ^{c-f}	14,9 ^{b-f}	10,3 ^{a-g}	50,1 ^{c-g}	4,0 ^{ab}	6,6 ^{a-e}	14,9 ^{a-e}	10,6 ^{a-d}	136,9 ^{b-f}
SF (150)	37,9 ^{jk}	17,6 ^{ab}	24,7 ^{fi}	20,1 ^{hij}	100,4 ^{hij}	21,4 ^{f-j}	31,3 ^{ghi}	26,9 ^{hij}	17,8 ^{hij}	97,4 ^{ijk}	15,4 ^{a-f}	21,9 ^{e-j}	28,5 ^{def}	37,3 ^{efg}	235,0 ^{hi}
SF (300)	42,0 ^k	19,8 ^{ab}	29,0 ⁱ	22,6 ^j	113,3 ^j	50,9 ^k	48,4 ^j	32,7 ^{ij}	22,2 ^j	154,2 ^l	25,4 ^{fg}	25,6 ^{hij}	18,2 ^{b-f}	51,1 ^{gh}	318,6 ^j

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädatte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäde, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäde, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 8. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2015 ensimmäisessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	2,0 ^{bg}	42,2 ^{fi}	6,1 ^b	2,2 ^{c-f}	68 ^{jk}	3,7 ^{g-j}	70 ^{ab}	59 ^{c-f}	40 ^{d-i}	9,4 ^j	3,7 ^{g-k}
A (200)	1,8 ^{a-f}	42,6 ^{fi}	7,2 ^{b-f}	2,1 ^{def}	62 ^{g-k}	3,4 ^{fg}	67 ^{ab}	66 ^{gh}	43 ^{g-j}	8,5 ^{g-j}	3,1 ^{c-h}
A (400)	1,8 ^{a-f}	42,3 ^{fi}	8,2 ^f	2,2 ^{def}	59 ^{f-j}	3,3 ^{fg}	67 ^{ab}	70 ^{gh}	49 ^{jk}	8,6 ^{g-j}	2,4 ^{bcd}
B (200)	2,0 ^{bg}	40,7 ^{fi}	7,5 ^{b-f}	2,3 ^{ef}	64 ^{h-k}	3,3 ^{fg}	68 ^{ab}	44 ^{ab}	41 ^{d-i}	8,2 ^{f-j}	4,3 ^{j-m}
B (400)	1,7 ^{a-f}	39,0 ^{e-i}	7,3 ^{b-f}	2,1 ^{c-f}	58 ^{e-j}	2,9 ^{def}	64 ^{ab}	39 ^a	42 ^{d-j}	7,5 ^{c-h}	4,1 ^{l-i}
C (200)	2,3 ^{gh}	39,3 ^{fi}	7,3 ^{b-f}	2,0 ^{a-f}	64 ^{h-k}	3,6 ^{gh}	70 ^{ab}	61 ^{d-g}	38 ^{d-j}	8,4 ^{f-j}	3,3 ^{d-i}
C (400)	2,2 ^{e-h}	37,1 ^{def}	7,5 ^{b-f}	2,0 ^{a-f}	57 ^{e-i}	3,9 ^{hij}	70 ^{ab}	75 ^{ghi}	46 ^{h-k}	8,6 ^{g-j}	2,8 ^{b-g}
D (200)	1,9 ^{a-f}	42,7 ^{ghi}	7,4 ^{b-f}	2,1 ^{c-f}	66 ^{ijk}	3,7 ^{ghi}	70 ^{ab}	72 ⁱ	42 ^{f-j}	8,3 ^{f-j}	3,3 ^{d-i}
D (400)	2,0 ^{bg}	43,3 ^{hi}	7,9 ^{ef}	2,1 ^{c-f}	62 ^{g-k}	3,7 ^{ghi}	71 ^{ab}	78 ^{hi}	45 ^{g-k}	8,7 ^{g-j}	3,1 ^{c-h}
E (200)	1,9 ^{a-f}	37,2 ^{d-g}	7,0 ^{b-f}	1,9 ^{a-f}	63 ^{h-k}	2,9 ^{c-f}	70 ^{ab}	46 ^{abc}	38 ^{c-g}	7,3 ^{c-g}	4,5 ^{klm}
E (400)	1,7 ^{a-e}	32,4 ^{bcd}	6,2 ^b	1,6 ^a	57 ^{e-j}	2,6 ^{a-f}	62 ^a	46 ^{abc}	35 ^{a-f}	6,9 ^{cde}	4,3 ^{j-m}
F (200)	1,7 ^{a-e}	28,7 ^{abc}	6,4 ^{bcd}	1,9 ^{a-e}	44 ^{abc}	2,4 ^{a-d}	60 ^a	39 ^a	37 ^{b-g}	6,2 ^{bcd}	3,4 ^{e-j}
F (400)	2,7 ^h	33,5 ^{cde}	6,1 ^b	2,3 ^{ef}	46 ^{a-d}	2,9 ^{def}	69 ^{ab}	48 ^{a-d}	42 ^{e-j}	7,8 ^{e-i}	2,7 ^{de}
G (200)	2,1 ^{c-g}	43,9 ^{hi}	6,7 ^{b-e}	2,3 ^{ef}	70 ^{jk}	3,6 ^{gh}	68 ^{ab}	56 ^{b-e}	40 ^{d-h}	9,3 ^j	3,8 ^{h-k}
G (400)	2,0 ^{bg}	42,2 ^{fi}	7,6 ^{c-f}	2,3 ^f	68 ^{ijk}	3,6 ^{ghi}	90 ^b	46 ^{abc}	39 ^{d-h}	8,9 ^{hij}	4,8 ^{lm}
H (200)	2,1 ^{bg}	44,1 ⁱ	6,3 ^{bc}	2,1 ^{c-f}	67 ^{ijk}	4,2 ^j	69 ^{ab}	119 ^j	49 ^{jk}	9,5 ^j	1,9 ^{ab}
H (400)	1,7 ^{a-e}	41,7 ^{ghi}	6,8 ^{b-e}	2,1 ^{c-f}	62 ^{g-k}	3,6 ^{ghi}	69 ^{ab}	121 ^j	52 ^k	9,0 ^{lj}	2,3 ^{abc}
I (200)	1,8 ^{a-f}	33,7 ^{cde}	3,6 ^a	1,9 ^{a-e}	56 ^{d-i}	4,1 ^{ij}	66 ^{ab}	118 ^j	52 ^k	7,2 ^{c-g}	4,6 ^{klm}
I (400)	2,2 ^{e-h}	29,2 ^{abc}	2,6 ^a	1,6 ^{ab}	43 ^{a-d}	3,7 ^{ghi}	65 ^{ab}	85 ⁱ	47 ^{ijk}	7,5 ^{d-h}	5,2 ^m
J (200) + SF (25)	1,5 ^{ab}	39,8 ^{fi}	7,9 ^{ef}	2,0 ^{a-f}	53 ^{c-g}	2,5 ^{a-e}	59 ^a	49 ^{a-d}	40 ^{d-h}	6,5 ^{b-e}	2,7 ^{b-f}
K (200) + SF (25)	1,6 ^{a-d}	38,0 ^{d-h}	7,7 ^{def}	2,1 ^{c-f}	55 ^{d-h}	2,6 ^{b-e}	63 ^a	36 ^a	34 ^{a-e}	6,6 ^{b-e}	3,7 ^{g-k}
SF (10)	1,5 ^{abc}	40,3 ^{fi}	7,1 ^{b-f}	2,0 ^{b-f}	60 ^{c-k}	3,3 ^{fg}	64 ^{ab}	50 ^{a-d}	38 ^{c-h}	7,5 ^{d-g}	3,8 ^{g-k}
SF (25)	1,4 ^a	37,4 ^{d-g}	7,1 ^{b-f}	1,8 ^{abc}	51 ^{c-f}	2,5 ^{a-e}	59 ^a	39 ^a	34 ^{a-d}	6,0 ^{bc}	3,7 ^{f-k}
SF (50)	1,6 ^{abc}	30,6 ^{bc}	7,2 ^{b-f}	1,8 ^{a-d}	48 ^{b-e}	2,3 ^{abc}	58 ^a	37 ^a	31 ^{abc}	5,3 ^{ab}	3,2 ^{c-i}
SF (150)	2,1 ^{d-g}	27,0 ^{ab}	7,2 ^{b-f}	1,9 ^{a-e}	40 ^{ab}	2,2 ^{ab}	57 ^a	36 ^a	30 ^{ab}	5,2 ^{ab}	2,0 ^{ab}
SF (300)	2,5 ^{gh}	23,9 ^a	7,0 ^{b-f}	1,9 ^{a-e}	37 ^{ab}	2,0 ^a	53 ^a	37 ^a	28 ^a	4,2 ^a	1,4 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Määdte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäde, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäde, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 9. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2015 toisessa niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	1,6 ^{abc}	41,1 ^{ab}	5,9 ^{bc}	2,0 ^{ab}	70 ^c	3,6 ^{abcd}	60 ^{ab}	65 ^{abc}	40 ^{abcdef}	9,8 ^{defghi}	3,3 ^{abc}
A (200)	1,9 ^{abcde}	43,0 ^b	7,2 ^{cd}	2,7 ^{abcd}	64 ^{bc}	3,4 ^{abcd}	67 ^{ab}	79 ^{bcddef}	45 ^{cdef}	10,7 ^{ghi}	4,8 ^{abcdef}
A (400)	2,1 ^{abcdef}	42,6 ^b	7,8 ^{cde}	2,9 ^{cd}	64 ^{bc}	3,3 ^{abcd}	66 ^{ab}	99 ^{defg}	47 ^{def}	10,6 ^{fghi}	3,7 ^{abcd}
B (200)	2,1 ^{abcdef}	35,3 ^{ab}	7,0 ^{cd}	2,4 ^{abc}	59 ^{abc}	3,0 ^a	61 ^{ab}	46 ^a	34 ^{abc}	9,1 ^{defg}	5,5 ^{abcdefg}
B (400)	2,1 ^{abcdef}	39,6 ^{ab}	7,6 ^{cde}	2,5 ^{abcd}	57 ^{abc}	3,2 ^{abcd}	64 ^{ab}	56 ^{abc}	37 ^{abcdef}	9,1 ^{defg}	6,0 ^{bcddefg}
C (200)	2,2 ^{abcdef}	40,1 ^{ab}	7,5 ^{cde}	2,6 ^{abcd}	59 ^{abc}	3,5 ^{abcd}	67 ^{ab}	83 ^{cde}	39 ^{abcdef}	10,2 ^{efghi}	4,3 ^{abcde}
C (400)	2,4 ^{efg}	43,2 ^b	7,8 ^{cde}	3,4 ^d	58 ^{abc}	3,7 ^{abcd}	68 ^{ab}	125 ^{gh}	46 ^{cdef}	11,6 ⁱ	3,0 ^{ab}
D (200)	2,3 ^{bcddef}	43,2 ^b	7,4 ^{cde}	2,9 ^{cd}	69 ^c	4,0 ^{bcd}	71 ^{ab}	107 ^{fg}	49 ^{ef}	11,5 ^{hi}	3,5 ^{abcd}
D (400)	2,2 ^{abcdef}	43,1 ^b	8,0 ^{cde}	2,8 ^{bcd}	61 ^{abc}	3,5 ^{abcd}	66 ^{ab}	105 ^{efg}	45 ^{cdef}	10,9 ^{ghi}	4,1 ^{abcde}
E (200)	2,3 ^{bcddefg}	38,5 ^{ab}	6,7 ^{bcd}	2,2 ^{abc}	64 ^{bc}	3,1 ^{abc}	68 ^{ab}	63 ^{abc}	34 ^{abc}	9,3 ^{defg}	6,6 ^{cdefg}
E (400)	2,3 ^{def}	37,3 ^{ab}	6,0 ^{bc}	2,2 ^{abc}	59 ^{abc}	3,0 ^a	64 ^{ab}	70 ^{abcd}	34 ^{abcd}	9,0 ^{defg}	6,2 ^{bcddefg}
F (200)	2,2 ^{bcddef}	32,2 ^{ab}	6,9 ^{cd}	2,3 ^{abc}	45 ^{ab}	2,8 ^a	59 ^{ab}	63 ^{abc}	35 ^{abcd}	7,7 ^{abcd}	6,2 ^{bcddefg}
F (400)	3,0 ^g	29,8 ^a	7,8 ^{cde}	2,9 ^{bcd}	42 ^a	3,1 ^a	70 ^{ab}	76 ^{abcde}	40 ^{bcddef}	7,9 ^{bcd}	5,3 ^{abcdef}
G (200)	1,9 ^{abcde}	42,1 ^b	6,6 ^{bcd}	2,4 ^{abc}	73 ^c	3,4 ^{abcd}	63 ^{ab}	63 ^{abc}	41 ^{bcddef}	10,6 ^{fghi}	3,9 ^{abcd}
G (400)	2,0 ^{abcde}	42,1 ^b	7,2 ^{cd}	2,6 ^{abcd}	70 ^c	3,4 ^{abcd}	54 ^a	55 ^{abc}	42 ^{cdef}	10,7 ^{ghi}	4,5 ^{abcde}
H (200)	1,5 ^{ab}	41,6 ^{ab}	6,6 ^{bcd}	2,3 ^{abc}	64 ^{bc}	3,4 ^{abcd}	67 ^{ab}	158 ^{ij}	45 ^{cdef}	9,9 ^{defghi}	2,4 ^a
H (400)	1,7 ^{abcd}	37,4 ^{ab}	6,1 ^{bc}	2,4 ^{abc}	60 ^{abc}	3,1 ^{ab}	67 ^{ab}	175 ^j	44 ^{cdef}	9,6 ^{defghi}	5,1 ^{abcdef}
I (200)	2,3 ^{cdef}	41,7 ^{ab}	4,5 ^{ab}	2,4 ^{abc}	63 ^{bc}	4,0 ^{cd}	71 ^{ab}	165 ^{ij}	49 ^f	10,2 ^{efgh}	6,6 ^{cdefg}
I (400)	2,7 ^{fg}	37,3 ^{ab}	2,8 ^a	2,1 ^{abc}	47 ^{ab}	4,1 ^d	73 ^b	140 ^{hi}	40 ^{abcdef}	8,5 ^{cdef}	8,8 ^g
J (200) + SF (25)	1,8 ^{abcde}	40,0 ^{ab}	7,4 ^{cde}	2,6 ^{abcd}	55 ^{abc}	3,0 ^a	61 ^{ab}	69 ^{abcd}	40 ^{abcdef}	8,9 ^{efg}	7,0 ^{defg}
K (200) + SF (25)	1,7 ^{abcde}	39,2 ^{ab}	6,8 ^{cd}	2,4 ^{abc}	61 ^{abc}	2,9 ^a	57 ^{ab}	54 ^{abc}	34 ^{abc}	8,7 ^{defg}	7,3 ^{efg}
SF (10)	1,6 ^{abcd}	36,9 ^{ab}	5,9 ^{bc}	2,2 ^{abc}	58 ^{abc}	3,2 ^{abcd}	61 ^{ab}	56 ^{abc}	36 ^{abcde}	9,1 ^{defg}	8,0 ^{fg}
SF (25)	1,5 ^a	40,3 ^{ab}	6,8 ^{bcd}	2,2 ^{abc}	61 ^{abc}	3,2 ^{abcd}	63 ^{ab}	60 ^{abc}	35 ^{abcd}	8,1 ^{cde}	6,7 ^{cdefg}
SF (50)	1,7 ^{abcde}	33,6 ^{ab}	8,1 ^{cde}	1,9 ^a	45 ^{ab}	2,8 ^a	58 ^{ab}	52 ^{ab}	28 ^{ab}	6,6 ^{abc}	6,3 ^{bcddefg}
SF (150)	2,2 ^{abcdef}	36,1 ^{ab}	8,5 ^{cde}	2,0 ^{abc}	43 ^a	2,7 ^a	59 ^{ab}	54 ^{abc}	27 ^a	5,7 ^{ab}	3,8 ^{abcd}
SF (300)	3,1 ^g	36,3 ^{ab}	9,6 ^e	2,2 ^{abc}	47 ^{ab}	3,2 ^{abc}	67 ^{ab}	63 ^{abc}	28 ^{ab}	5,6 ^a	3,1 ^{ab}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 10. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2015 kolmannessa neljänneksessä. Eri kirjaimilla merkityt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	1,7 ^a	41,0 ^{ab}	6,6 ^b	1,9 ^a	71 ^{bc}	3,6 ^{bcd}	65 ^a	119 ^{abcdef}	48 ^{a-f}	10,5 ^{d-g}	2,8 ^{a-e}
A (200)	1,9 ^{abc}	42,8 ^{ab}	7,8 ^{bcddefgh}	2,5 ^{abcde}	65 ^{abc}	3,2 ^{ab}	66 ^a	121 ^{bcddef}	51 ^{c-g}	10,9 ^{e-h}	3,2 ^{a-h}
A (400)	2,2 ^{abcde}	43,4 ^{ab}	9,0 ^{hij}	3,5 ^{ghij}	59 ^{abc}	3,1 ^{ab}	69 ^{abcde}	137 ^{efg}	55 ^{e-g}	11,6 ^{f-h}	2,7 ^{a-d}
B (200)	2,4 ^{bcddefg}	43,6 ^{ab}	8,0 ^{cdefgh}	3,3 ^{efghij}	66 ^{abc}	3,3 ^{ab}	68 ^{abcdd}	74 ^a	47 ^{a-e}	11,4 ^{e-h}	4,6 ^{gh}
B (400)	2,3 ^{abcdef}	43,7 ^{ab}	8,4 ^{efghi}	3,4 ^{ghij}	63 ^{abc}	3,2 ^{ab}	67 ^{abc}	78 ^{ab}	46 ^{a-e}	10,6 ^{d-g}	4,0 ^{c-h}
C (200)	2,3 ^{bcddefg}	44,2 ^{ab}	9,0 ^{hij}	3,6 ^{hijk}	62 ^{abc}	3,2 ^{ab}	69 ^{abcde}	119 ^{abcdef}	48 ^{a-f}	11,5 ^{e-h}	3,2 ^{a-h}
C (400)	2,5 ^{cdefg}	42,3 ^{ab}	10,4 ^k	4,3 ^{kl}	54 ^a	3,3 ^{ab}	71 ^{abcdef}	177 ^{gh}	59 ^{gh}	12,5 ^h	2,3 ^{ab}
D (200)	2,2 ^{abcde}	42,2 ^a	8,2 ^{cdefghi}	3,2 ^{efghi}	65 ^{abc}	3,2 ^{ab}	64 ^a	132 ^{defg}	50 ^{b-f}	12,2 ^{gh}	3,0 ^{a-f}
D (400)	2,3 ^{bcddefg}	44,1 ^{ab}	9,7 ^{kl}	4,0 ^{kl}	58 ^{abc}	3,2 ^{ab}	68 ^{abcde}	127 ^{cdef}	51 ^{b-g}	11,7 ^{f-h}	3,4 ^{b-h}
E (200)	2,8 ^{efg}	44,8 ^{ab}	8,3 ^{efghi}	3,2 ^{efghi}	73 ^{bc}	3,3 ^{ab}	75 ^{cdef}	107 ^{abcde}	49 ^{b-f}	11,7 ^{f-h}	4,0 ^{c-h}
E (400)	2,7 ^{defg}	44,1 ^{ab}	8,1 ^{cdefgh}	3,6 ^{ghijk}	63 ^{abc}	3,1 ^{ab}	72 ^{abcdef}	97 ^{abcde}	46 ^{a-e}	11,3 ^{e-h}	4,6 ^{gh}
F (200)	2,3 ^{bcddefg}	43,2 ^{ab}	8,9 ^{ghij}	3,9 ^{jkl}	57 ^{abc}	2,9 ^a	70 ^{abcdef}	81 ^{abc}	44 ^{abc}	8,8 ^{b-d}	4,7 ^h
F (400)	2,9 ^g	44,7 ^{ab}	8,8 ^{ghij}	4,4 ^l	56 ^{ab}	3,0 ^{ab}	79 ^f	86 ^{abcd}	50 ^{b-g}	8,5 ^{bc}	3,8 ^{b-h}
G (200)	2,0 ^{abc}	42,7 ^{ab}	7,7 ^{bcddefg}	2,5 ^{abcd}	73 ^c	3,5 ^{bc}	66 ^{ab}	114 ^{abcde}	52 ^{c-g}	11,6 ^{e-h}	3,1 ^{a-g}
G (400)	2,1 ^{abcd}	42,3 ^{ab}	8,2 ^{cdefghi}	3,3 ^{efghij}	66 ^{abc}	3,2 ^{ab}	67 ^{abcd}	76 ^{ab}	49 ^{b-f}	11,8 ^{f-h}	3,5 ^{b-h}
H (200)	1,8 ^{ab}	42,3 ^{ab}	6,9 ^{bc}	2,2 ^{ab}	73 ^c	3,9 ^{cd}	68 ^{abcde}	201 ^{hi}	54 ^{d-g}	10,9 ^{e-h}	1,8 ^a
H (400)	2,0 ^{abc}	45,4 ^{ab}	7,5 ^{bcdde}	2,9 ^{bcddefg}	71 ^{abc}	3,5 ^{bc}	75 ^{bcddef}	233 ⁱ	57 ^{f-h}	11,3 ^{e-h}	2,8 ^{a-e}
I (200)	2,5 ^{cdefg}	42,4 ^{ab}	4,9 ^a	2,9 ^{bcddefgh}	57 ^{abc}	4,1 ^{de}	70 ^{abcde}	206 ^{hi}	66 ^h	11,3 ^{e-h}	6,6 ⁱ
I (400)	2,8 ^{fg}	47,6 ^b	4,0 ^a	2,5 ^{abcde}	62 ^{abc}	4,5 ^e	77 ^{ef}	163 ^{fgh}	65 ^h	10,4 ^{c-g}	6,8 ⁱ
J (200) + SF (25)	2,1 ^{abcd}	44,2 ^{ab}	8,4 ^{efghi}	3,3 ^{efghij}	63 ^{abc}	3,2 ^{ab}	69 ^{abcde}	88 ^{abcd}	51 ^{b-g}	10,6 ^{d-h}	3,4 ^{b-h}
K (200) + SF (25)	2,3 ^{bcddefg}	45,7 ^{ab}	8,0 ^{cdefgh}	3,2 ^{defghi}	69 ^{abc}	3,5 ^{bc}	66 ^a	102 ^{abcde}	51 ^{b-g}	11,2 ^{e-h}	4,3 ^{e-h}
SF (10)	1,7 ^{ab}	44,7 ^{ab}	7,0 ^{bcd}	2,4 ^{abc}	69 ^{abc}	3,5 ^{bc}	66 ^{abc}	102 ^{abcde}	44 ^{a-c}	9,6 ^{c-e}	3,6 ^{b-h}
SF (25)	1,8 ^{abc}	43,8 ^{ab}	7,6 ^{bcddef}	2,7 ^{bcddef}	71 ^{abc}	3,4 ^{abc}	65 ^a	96 ^{abcde}	45 ^{a-d}	10,0 ^{c-f}	4,6 ^{fgh}
SF (50)	2,1 ^{abcde}	44,6 ^{ab}	7,9 ^{bcddefgh}	3,0 ^{cdefgh}	71 ^{abc}	3,4 ^{abc}	69 ^{abcde}	81 ^{abc}	42 ^{ab}	8,8 ^{b-d}	4,1 ^{d-h}
SF (150)	2,4 ^{bcddefg}	44,4 ^{ab}	9,4 ^{ijk}	3,2 ^{cdefghi}	62 ^{abc}	3,0 ^{ab}	71 ^{abcdef}	77 ^{ab}	39 ^a	7,0 ^{ab}	3,3 ^{a-h}
SF (300)	2,8 ^{fg}	42,7 ^a	10,2 ^k	3,3 ^{ghij}	58 ^{abc}	3,1 ^{ab}	76 ^{def}	74 ^a	39 ^a	5,6 ^a	2,5 ^{a-c}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mäddäte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 11. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2015 neljännessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	2,1 ^{ab}	42,5 ^a	9,6 ^{bcd}	1,9 ^a	73 ^{bcd}	4,0 ^d	89 ^a	198 ^{fg}	61 ^{bcd}	12,3 ^{cde}	2,2 ^{abc}
A (200)	2,3 ^{abcd}	43,5 ^a	9,3 ^{bcd}	2,5 ^{abcd}	74 ^{bcd}	3,8 ^{abcd}	83 ^a	169 ^{defg}	62 ^{bcd}	12,7 ^{de}	2,7 ^{abcde}
A (400)	2,5 ^{abcdef}	42,5 ^a	10,9 ^{ef}	3,2 ^{defgh}	65 ^{abcd}	3,6 ^{abcd}	84 ^a	157 ^{cdefg}	67 ^{cdef}	13,3 ^e	2,5 ^{abcde}
B (200)	2,7 ^{abcdefg}	43,1 ^a	9,6 ^{bcd}	3,1 ^{defgh}	75 ^{cd}	3,7 ^{abcd}	91 ^a	85 ^{ab}	57 ^{abc}	13,1 ^e	4,1 ^{cdef}
B (400)	2,8 ^{abcdefg}	43,7 ^a	9,6 ^{bcd}	3,3 ^{ghi}	70 ^{abcd}	3,6 ^{abcd}	90 ^a	102 ^{abcd}	57 ^{abc}	12,8 ^{de}	3,2 ^{abce}
C (200)	2,6 ^{abcdefg}	43,2 ^a	10,5 ^{cdef}	3,2 ^{defgh}	67 ^{abcd}	3,5 ^{abcd}	86 ^a	126 ^{abcdef}	57 ^{abc}	13,1 ^e	2,9 ^{abcde}
C (400)	2,7 ^{abcdefg}	42,6 ^a	10,8 ^{def}	3,5 ^{ghi}	61 ^{abc}	3,5 ^{abcd}	82 ^a	178 ^{efgh}	60 ^{bcd}	13,6 ^e	2,3 ^{abcd}
D (200)	2,6 ^{abcdefg}	44,0 ^a	10,5 ^{cdef}	3,4 ^{ghi}	68 ^{abcd}	3,9 ^{bcd}	98 ^a	144 ^{abcdefg}	63 ^{cde}	14,3 ^e	3,1 ^{abcde}
D (400)	2,8 ^{bcd}	44,6 ^a	11,2 ^f	3,8 ^{hi}	68 ^{abcd}	3,8 ^{abcd}	104 ^a	149 ^{bcd}	64 ^{cde}	14,2 ^e	3,1 ^{abcde}
E (200)	3,0 ^{cdefg}	44,5 ^a	9,4 ^{bcd}	3,0 ^{cdefg}	75 ^{bcd}	3,5 ^{abcd}	97 ^a	118 ^{abcde}	57 ^{abc}	12,8 ^{de}	3,3 ^{abcde}
E (400)	3,0 ^{defg}	43,0 ^a	8,4 ^b	3,3 ^{efghi}	66 ^{abcd}	3,3 ^a	86 ^a	94 ^{abc}	52 ^{abc}	12,8 ^{de}	4,2 ^{def}
F (200)	2,7 ^{abcdefg}	42,3 ^a	9,6 ^{bcd}	3,5 ^{ghi}	62 ^{abc}	3,3 ^a	81 ^a	96 ^{abc}	56 ^{abc}	10,6 ^{bcd}	4,3 ^{ef}
F (400)	3,1 ^{efg}	44,0 ^a	9,5 ^{bcd}	4,0 ⁱ	68 ^{abcd}	3,4 ^{abc}	83 ^a	103 ^{abcd}	63 ^{bcd}	10,1 ^{bc}	3,5 ^{bcd}
G (200)	2,5 ^{abcdef}	43,0 ^a	9,4 ^{bcd}	2,6 ^{abcde}	78 ^d	3,9 ^{cd}	93 ^a	132 ^{abcdefg}	61 ^{bcd}	13,6 ^e	2,8 ^{abcde}
G (400)	2,5 ^{abcde}	43,3 ^a	10,2 ^{bcd}	3,2 ^{defgh}	71 ^{abcd}	3,8 ^{abcd}	95 ^a	74 ^a	58 ^{bcd}	13,5 ^e	3,9 ^{cdef}
H (200)	2,3 ^{abcd}	44,3 ^a	8,8 ^{bc}	2,3 ^{abc}	75 ^{cd}	3,7 ^{abcd}	99 ^a	353 ⁱ	75 ^{ef}	13,5 ^e	1,3 ^a
H (400)	2,3 ^{abcd}	45,3 ^a	9,0 ^{bcd}	2,5 ^{abcd}	74 ^{bcd}	3,6 ^{abcd}	97 ^a	380 ⁱ	74 ^{def}	13,5 ^e	1,7 ^{ab}
I (200)	2,7 ^{abcdefg}	42,5 ^a	5,6 ^a	2,7 ^{abcdef}	60 ^{ab}	4,6 ^e	78 ^a	203 ^{gh}	80 ^{fg}	13,3 ^e	5,6 ^{fg}
I (400)	3,2 ^{fg}	45,8 ^a	5,6 ^a	2,5 ^{abcd}	58 ^a	5,2 ^e	95 ^a	248 ^h	91 ^g	12,7 ^{de}	6,8 ^g
J (200) + SF (25)	2,3 ^{abc}	42,8 ^a	10,1 ^{bcd}	2,6 ^{abcdef}	65 ^{abcd}	3,3 ^{ab}	81 ^a	152 ^{bcd}	60 ^{bcd}	12,2 ^{bcd}	2,7 ^{abcde}
K (200) + SF (25)	2,5 ^{abcdef}	43,9 ^a	10,1 ^{bcd}	2,9 ^{bcd}	70 ^{abcd}	3,6 ^{abcd}	98 ^a	117 ^{abcde}	58 ^{bc}	13,4 ^e	3,0 ^{abcde}
SF (10)	2,1 ^{ab}	44,6 ^a	9,1 ^{bcd}	2,2 ^{ab}	71 ^{abcd}	3,9 ^{bcd}	91 ^a	197 ^{ghi}	59 ^{bcd}	12,4 ^{de}	1,8 ^{ab}
SF (25)	2,1 ^a	43,1 ^a	9,1 ^{bcd}	2,5 ^{abcd}	68 ^{abcd}	3,6 ^{abcd}	75 ^a	116 ^{abcde}	57 ^{abc}	12,7 ^{de}	3,2 ^{abcde}
SF (50)	2,6 ^{abcdefg}	45,2 ^a	9,7 ^{bcd}	2,8 ^{bcd}	75 ^{bcd}	3,8 ^{abcd}	84 ^a	118 ^{abcde}	57 ^{abc}	12,7 ^{de}	3,2 ^{abcde}
SF (150)	2,9 ^{cdefg}	43,9 ^a	10,8 ^{def}	3,0 ^{cdefg}	66 ^{abcd}	3,3 ^{ab}	86 ^a	100 ^{abcd}	48 ^{ab}	9,9 ^{ab}	3,4 ^{bcd}
SF (300)	3,3 ^g	42,8 ^a	10,7 ^{cdef}	3,0 ^{cdefg}	63 ^{abcd}	3,4 ^{abc}	88 ^a	85 ^{ab}	42 ^a	7,8 ^a	2,6 ^{abcde}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Määdte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäde, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäde, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 12. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2016 ensimmäisessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	1,2 ^{ab}	41,5 ^{bc}	11,7 ^{efgh}	1,7 ^a	60 ^{bc}	3,1 ^c	62 ^a	73 ^{abcdef}	35 ^{ab}	7,6 ^{abc}	4,5 ^{ab}
A (200)	1,3 ^{ab}	40,5 ^{bc}	12,2 ^{fgh}	1,9 ^{abcde}	64 ^{bc}	2,9 ^{bc}	67 ^a	68 ^{abcd}	36 ^{abc}	8,3 ^{abcde}	5,0 ^{ab}
A (400)	1,7 ^{abc}	41,3 ^{bc}	9,8 ^{cdef}	2,0 ^{bcde}	69 ^c	3,1 ^{bc}	82 ^{ab}	63 ^{abc}	42 ^{bcd}	10,0 ^{def}	4,5 ^{ab}
B (200)	1,5 ^{abc}	40,3 ^{bc}	10,1 ^{cdefgh}	2,0 ^{abcde}	67 ^{bc}	3,1 ^{bc}	73 ^{ab}	57 ^{ab}	41 ^{bcd}	9,2 ^{bcdef}	5,5 ^{ab}
B (400)	1,6 ^{abc}	39,7 ^{bc}	10,0 ^{cdefg}	2,1 ^{cde}	66 ^{bc}	3,1 ^c	72 ^{ab}	61 ^{abc}	41 ^{bcd}	9,2 ^{bcdef}	5,5 ^{ab}
C (200)	1,5 ^{abc}	41,0 ^{bc}	11,6 ^{defgh}	2,1 ^{cde}	64 ^{bc}	3,0 ^{bc}	72 ^{ab}	85 ^{cdefg}	41 ^{bcd}	9,2 ^{bcdef}	4,3 ^a
C (400)	1,7 ^{bc}	40,9 ^{bc}	9,9 ^{cdefg}	2,1 ^{cde}	68 ^{bc}	3,2 ^c	78 ^{ab}	81 ^{bcdef}	43 ^{bcd}	10,1 ^{ef}	3,9 ^a
D (200)	1,4 ^{ab}	39,9 ^{bc}	11,9 ^{efgh}	2,0 ^{bcde}	64 ^{bc}	3,1 ^{bc}	98 ^b	74 ^{abcdef}	42 ^{bcd}	8,8 ^{bcde}	5,4 ^{ab}
D (400)	1,4 ^{abc}	40,0 ^{bc}	10,6 ^{cdefgh}	2,0 ^{abcde}	64 ^{bc}	2,9 ^{bc}	75 ^{ab}	72 ^{abcdef}	41 ^{bcd}	9,1 ^{bcdef}	4,5 ^{ab}
E (200)	1,4 ^{ab}	39,6 ^{bc}	11,0 ^{defgh}	1,9 ^{abcde}	61 ^{bc}	2,7 ^{bc}	70 ^{ab}	62 ^{abc}	36 ^{abc}	8,5 ^{bcde}	4,6 ^{ab}
E (400)	1,6 ^{abc}	40,3 ^{bc}	9,4 ^{cde}	2,2 ^{de}	66 ^{bc}	2,8 ^{bc}	77 ^{ab}	77 ^{bcdef}	42 ^{bcd}	9,3 ^{bcdef}	4,6 ^{ab}
F (200)	1,6 ^{abc}	39,7 ^{bc}	8,3 ^{bc}	2,0 ^{abcde}	67 ^{bc}	2,9 ^{bc}	71 ^{ab}	69 ^{abcde}	39 ^{abc}	8,6 ^{bcde}	4,8 ^{ab}
F (400)	1,4 ^{abc}	36,4 ^b	9,6 ^{cde}	2,1 ^{de}	59 ^{bc}	2,7 ^b	73 ^{ab}	55 ^{ab}	44 ^{cd}	7,6 ^{abc}	5,4 ^{ab}
G (200)	1,4 ^{ab}	40,5 ^{bc}	12,4 ^{gh}	1,9 ^{abcde}	64 ^{bc}	3,1 ^{bc}	70 ^{ab}	66 ^{abcd}	39 ^{abc}	8,8 ^{bcde}	6,0 ^{ab}
G (400)	1,5 ^{abc}	41,7 ^{bc}	11,4 ^{defgh}	1,9 ^{abcde}	64 ^{bc}	3,1 ^{bc}	70 ^{ab}	58 ^{ab}	40 ^{abc}	9,4 ^{cdef}	6,4 ^{abc}
H (200)	1,3 ^{ab}	42,5 ^c	11,6 ^{defgh}	1,8 ^{abcd}	61 ^{bc}	2,9 ^{bc}	68 ^a	93 ^{efg}	37 ^{abc}	7,7 ^{abc}	6,3 ^{abc}
H (400)	1,3 ^{ab}	41,5 ^{bc}	12,2 ^{fgh}	1,9 ^{abcde}	61 ^{bc}	2,9 ^{bc}	75 ^{ab}	108 ^g	48 ^d	8,2 ^{abcd}	6,9 ^{bcd}
I (200)	1,4 ^{abc}	43,4 ^c	5,9 ^{ab}	2,1 ^{cde}	62 ^{bc}	3,1 ^{bc}	71 ^{ab}	96 ^{fg}	49 ^d	8,8 ^{bcde}	9,0 ^d
I (400)	1,9 ^c	43,9 ^c	4,3 ^a	2,2 ^e	68 ^{bc}	3,0 ^{bc}	77 ^{ab}	89 ^{defg}	62 ^e	10,7 ⁱ	8,7 ^{cd}
J (200) + SF (25)	1,4 ^{abc}	41,8 ^{bc}	11,7 ^{efgh}	1,9 ^{abcde}	61 ^{bc}	2,9 ^{bc}	80 ^{ab}	89 ^{defg}	36 ^{abc}	8,5 ^{bcde}	5,2 ^{ab}
K (200) + SF (25)	1,3 ^{ab}	41,9 ^{bc}	11,4 ^{defgh}	1,9 ^{abcde}	59 ^{bc}	3,0 ^{bc}	67 ^a	69 ^{abcde}	38 ^{abc}	8,3 ^{abcde}	5,7 ^{ab}
SF (10)	1,2 ^a	40,7 ^{bc}	12,6 ^h	1,7 ^{ab}	57 ^{bc}	3,0 ^{bc}	62 ^a	75 ^{abcdef}	34 ^{ab}	7,5 ^{ab}	5,4 ^{ab}
SF (25)	1,2 ^{ab}	39,4 ^{bc}	11,6 ^{efgh}	1,7 ^{abc}	55 ^b	2,9 ^{bc}	78 ^{ab}	64 ^{abcd}	35 ^{ab}	7,6 ^{abc}	5,3 ^{ab}
SF (50)	1,6 ^{abc}	43,0 ^c	10,3 ^{cdefgh}	2,0 ^{abcde}	66 ^{bc}	3,2 ^c	71 ^{ab}	71 ^{abcdef}	39 ^{abc}	8,8 ^{bcde}	4,7 ^{ab}
SF (150)	1,4 ^{ab}	41,0 ^{bc}	10,2 ^{cdefgh}	1,9 ^{abcde}	62 ^{bc}	2,9 ^{bc}	74 ^{ab}	72 ^{abcdef}	37 ^{abc}	8,0 ^{abc}	6,0 ^{ab}
SF (300)	1,2 ^{ab}	28,5 ^a	9,0 ^{cd}	1,7 ^{ab}	42 ^a	2,0 ^a	62 ^a	50 ^a	32 ^a	6,6 ^a	4,0 ^a

*A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Määdäte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 13. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)- ja kupari (Cu) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2016 toisessa niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu
Kontrolli	1,8 ^{a-d}	45,0 ^c	9,1 ^{cd}	2,0 ^{a-d}	75 ^f	3,6 ^f	82 ^b	74 ^{a-e}	43 ^{cd}	10,5 ^{bcd}
A (200)	1,8 ^{a-d}	44,2 ^c	8,5 ^{bcd}	2,0 ^{a-d}	73 ^{def}	3,2 ^{def}	76 ^{bc}	73 ^{a-d}	40 ^{bc}	10,7 ^{bcd}
A (400)	1,8 ^{a-d}	40,4 ^{bc}	7,9 ^{bcd}	1,8 ^a	63 ^{c-f}	3,0 ^{b-e}	76 ^{bc}	61 ^{ab}	39 ^{bc}	10,3 ^{bcd}
B (200)	1,7 ^{a-d}	39,4 ^{bc}	7,4 ^{bc}	1,8 ^{ab}	65 ^{c-f}	2,9 ^{a-d}	74 ^{bc}	55 ^a	36 ^{bc}	10,1 ^{bcd}
B (400)	1,9 ^{a-d}	42,4 ^{bc}	7,4 ^{bc}	1,9 ^{ab}	65 ^{c-f}	3,0 ^{c-f}	83 ^{bc}	68 ^{a-d}	38 ^{bc}	11,3 ^{cd}
C (200)	2,0 ^{a-d}	43,1 ^{bc}	8,5 ^{bcd}	2,3 ^{a-e}	69 ^{def}	3,1 ^{c-f}	78 ^{bc}	76 ^{a-e}	38 ^{bc}	10,7 ^{bcd}
C (400)	1,9 ^{a-d}	40,2 ^{bc}	8,9 ^{cd}	2,5 ^{b-e}	51 ^{bc}	2,9 ^{abcd}	75 ^{bc}	77 ^{a-e}	38 ^{bc}	11,2 ^{cd}
D (200)	1,7 ^{a-d}	44,0 ^{bc}	8,6 ^{bcd}	2,0 ^{a-d}	70 ^{def}	3,5 ^{ef}	76 ^{bc}	71 ^{a-d}	41 ^{bcd}	10,5 ^{bcd}
D (400)	1,7 ^{abc}	40,1 ^{bc}	7,9 ^{bcd}	1,7 ^a	64 ^{c-f}	3,0 ^{def}	76 ^{bc}	75 ^{a-e}	38 ^{bc}	10,7 ^{bcd}
E (200)	2,1 ^{a-d}	43,0 ^{bc}	7,7 ^{bcd}	1,9 ^{abc}	72 ^{def}	3,1 ^{c-f}	76 ^{bc}	65 ^{a-d}	37 ^{bc}	11,0 ^{cd}
E (400)	2,3 ^{cd}	39,6 ^{bc}	7,5 ^{bc}	2,7 ^{cde}	58 ^{cd}	2,9 ^{a-d}	75 ^{bc}	87 ^{b-g}	37 ^{bc}	11,3 ^{cd}
F (200)	1,5 ^a	34,9 ^{ab}	7,2 ^b	1,7 ^a	51 ^{bc}	2,6 ^{abc}	68 ^b	95 ^{d-g}	36 ^{bc}	9,1 ^{abc}
F (400)	2,2 ^{bcd}	29,5 ^a	8,0 ^{bcd}	2,8 ^e	38 ^{ab}	2,4 ^{ab}	69 ^b	86 ^{b-g}	32 ^{ab}	8,7 ^{ab}
G (200)	1,9 ^{a-d}	44,1 ^c	8,5 ^{bcd}	2,0 ^{a-d}	76 ^f	3,3 ^{def}	82 ^{bc}	62 ^{abc}	43 ^{cd}	11,0 ^{cd}
G (400)	1,5 ^{ab}	40,6 ^{bc}	8,4 ^{bcd}	1,8 ^{ab}	69 ^{def}	2,9 ^{a-d}	71 ^b	57 ^{ab}	37 ^{bc}	10,2 ^{bcd}
H (200)	2,0 ^{a-d}	43,1 ^{bc}	8,9 ^{bcd}	2,2 ^{a-e}	73 ^{ef}	3,3 ^{def}	81 ^{bc}	109 ^{fg}	43 ^{cd}	10,4 ^{bcd}
H (400)	2,1 ^{a-d}	43,3 ^{bc}	8,1 ^{bcd}	2,1 ^{a-e}	73 ^{ef}	3,3 ^{def}	78 ^{bc}	105 ^{efg}	40 ^{bc}	10,8 ^{bcd}
I (200)	1,9 ^{a-d}	43,2 ^{bc}	5,4 ^a	2,0 ^{abc}	71 ^{def}	3,6 ^{ef}	74 ^{bc}	111 ^g	50 ^{de}	11,5 ^d
I (400)	2,3 ^{cd}	41,2 ^{bc}	4,5 ^a	2,3 ^{a-e}	66 ^{c-f}	3,3 ^{def}	74 ^{bc}	109 ^{fg}	56 ^e	12,0 ^d
J (200) + SF (25)	2,1 ^{a-d}	43,3 ^{bc}	8,7 ^{bcd}	2,1 ^{a-e}	73 ^{def}	3,4 ^{def}	77 ^{bc}	92 ^{c-g}	40 ^{bc}	11,3 ^{cd}
K (200) + SF (25)	2,0 ^{a-d}	41,9 ^{bc}	8,1 ^{bcd}	1,9 ^{abc}	71 ^{def}	3,3 ^{def}	75 ^{bc}	66 ^{a-d}	39 ^{bc}	10,5 ^{bcd}
SF (10)	1,8 ^{a-d}	42,1 ^{bc}	8,9 ^{cd}	2,0 ^{a-d}	69 ^{def}	3,3 ^{def}	81 ^{bc}	87 ^{b-g}	43 ^{cd}	10,1 ^{bcd}
SF (25)	1,9 ^{a-d}	41,9 ^{bc}	8,4 ^{bcd}	1,9 ^{abc}	69 ^{def}	3,3 ^{def}	93 ^c	74 ^{a-d}	39 ^{bc}	10,0 ^{bcd}
SF (50)	2,0 ^{a-d}	43,7 ^{bc}	8,5 ^{bcd}	2,2 ^{a-e}	72 ^{def}	3,3 ^{def}	86 ^{bc}	73 ^{a-d}	41 ^{bcd}	10,3 ^{bcd}
SF (150)	2,3 ^{cd}	41,5 ^{bc}	9,0 ^{cd}	2,7 ^{de}	59 ^{cde}	3,3 ^{def}	82 ^{bc}	80 ^{a-f}	37 ^{bc}	11,3 ^{cd}
SF (300)	2,3 ^d	26,4 ^a	9,4 ^d	2,3 ^{a-e}	34 ^a	2,3 ^a	22 ^a	67 ^{a-d}	22 ^a	7,5 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 14. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)- ja kupari (Cu) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2016 kolmannessa neljänneksessä. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu
Kontrolli	1,7 ^a	41,0 ^a	10,1 ^b	1,7 ^a	63 ^{ef}	3,4 ^{cd}	86 ^{cd}	87 ^a	42 ^{bc}	10,7 ^{bcd}
A (200)	2,0 ^{abc}	42,8 ^{ab}	11,2 ^b	2,0 ^{a-d}	63 ^{ef}	3,3 ^{cd}	83 ^{cd}	80 ^a	45 ^c	11,6 ^{bcd}
A (400)	2,2 ^{abc}	43,4 ^{ab}	10,8 ^b	2,2 ^{a-d}	58 ^{c-f}	3,5 ^{de}	91 ^d	92 ^a	47 ^{cd}	13,5 ^d
B (200)	1,9 ^{abc}	43,4 ^{ab}	10,1 ^b	2,1 ^{a-d}	61 ^{c-f}	3,3 ^{bcd}	81 ^{cd}	85 ^a	42 ^{bc}	12,1 ^{cd}
B (400)	2,4 ^{bc}	43,7 ^{ab}	11,2 ^b	2,5 ^{a-d}	57 ^{c-f}	3,5 ^{de}	85 ^{cd}	107 ^{ab}	46 ^{cd}	13,6 ^d
C (200)	2,0 ^{abc}	44,2 ^{ab}	11,7 ^b	2,4 ^{a-d}	57 ^{c-f}	3,0 ^{bc}	78 ^{bcd}	76 ^a	42 ^{bc}	11,0 ^{bcd}
C (400)	2,3 ^{abc}	42,3 ^{ab}	11,3 ^b	2,7 ^d	41 ^{ab}	3,0 ^{bc}	76 ^{abcd}	98 ^a	37 ^{abc}	11,6 ^{bcd}
D (200)	1,9 ^{abc}	42,2 ^{ab}	10,6 ^b	2,0 ^{a-d}	61 ^{c-f}	3,4 ^{cd}	82 ^{cd}	78 ^a	43 ^{bc}	11,3 ^{bcd}
D (400)	2,2 ^{abc}	44,1 ^{ab}	11,0 ^b	2,3 ^{a-d}	58 ^{c-f}	3,5 ^{cd}	84 ^{cd}	124 ^{ab}	48 ^{cd}	13,3 ^{cd}
E (200)	2,3 ^{abc}	44,8 ^{ab}	9,7 ^b	2,1 ^{a-d}	60 ^{c-f}	3,2 ^{bcd}	80 ^{bcd}	84 ^a	43 ^{bc}	11,9 ^{bcd}
E (400)	2,4 ^c	44,1 ^{ab}	9,8 ^b	2,6 ^{cd}	41 ^{ab}	2,8 ^{ab}	73 ^{abc}	99 ^a	38 ^{bc}	11,2 ^{bcd}
F (200)	2,2 ^{abc}	43,2 ^{ab}	10,2 ^b	2,2 ^{a-d}	51 ^{b-e}	3,1 ^{bcd}	81 ^{bcd}	185 ^b	39 ^{bc}	11,2 ^{bcd}
F (400)	2,2 ^{abc}	44,7 ^{ab}	10,9 ^b	2,6 ^{bcd}	32 ^a	2,5 ^a	66 ^{ab}	130 ^{ab}	29 ^{ab}	8,8 ^{ab}
G (200)	2,1 ^{abc}	42,7 ^{ab}	11,2 ^b	2,0 ^{a-d}	64 ^f	3,3 ^{bcd}	84 ^{cd}	68 ^a	47 ^{cd}	11,6 ^{bcd}
G (400)	1,9 ^{abc}	42,3 ^{ab}	10,5 ^b	2,0 ^{a-d}	60 ^{c-f}	3,3 ^{bcd}	83 ^{cd}	82 ^a	46 ^{cd}	12,0 ^{cd}
H (200)	2,0 ^{abc}	42,3 ^{ab}	11,2 ^b	2,0 ^{a-d}	62 ^{def}	3,3 ^{cd}	85 ^{cd}	149 ^{ab}	47 ^{cd}	11,8 ^{bcd}
H (400)	2,0 ^{abc}	45,4 ^{ab}	11,4 ^b	2,1 ^{a-d}	61 ^{def}	3,3 ^{cd}	90 ^d	138 ^{ab}	45 ^{cd}	11,5 ^{bcd}
I (200)	2,1 ^{abc}	42,4 ^{ab}	6,3 ^a	2,0 ^{a-d}	59 ^{c-f}	4,0 ^e	82 ^{bcd}	139 ^{ab}	59 ^{de}	12,0 ^{cd}
I (400)	2,4 ^{bc}	47,6 ^b	6,0 ^a	2,3 ^{a-d}	50 ^{bcd}	3,6 ^{de}	82 ^{cd}	104 ^{ab}	65 ^e	12,2 ^{cd}
J (200) + SF (25)	2,1 ^{abc}	44,2 ^{ab}	11,3 ^b	2,2 ^{a-d}	63 ^{ef}	3,3 ^{cd}	87 ^{cd}	107 ^{ab}	46 ^{cd}	11,5 ^{bcd}
K (200) + SF (25)	2,0 ^{abc}	45,7 ^{ab}	10,1 ^b	2,0 ^{a-d}	64 ^f	3,4 ^d	79 ^{bcd}	76 ^a	42 ^{bc}	11,2 ^{bcd}
SF (10)	1,8 ^{ab}	44,7 ^{ab}	11,7 ^b	1,9 ^{abc}	61 ^{c-f}	3,3 ^{bcd}	79 ^{bcd}	110 ^{ab}	44 ^c	10,2 ^{abc}
SF (25)	1,9 ^{abc}	43,8 ^{ab}	10,7 ^b	1,9 ^{a-d}	62 ^{def}	3,4 ^d	83 ^{cd}	97 ^a	45 ^{cd}	11,7 ^{bcd}
SF (50)	2,1 ^{abc}	46,7 ^b	10,8 ^b	2,2 ^{a-d}	64 ^f	3,5 ^{cd}	85 ^{cd}	82 ^a	47 ^{cd}	11,9 ^{bcd}
SF (150)	2,1 ^{abc}	44,4 ^{ab}	11,2 ^b	2,6 ^{cd}	49 ^{bc}	3,1 ^{bcd}	73 ^{abc}	93 ^a	38 ^{bc}	12,3 ^{cd}
SF (300)	2,1 ^{abc}	42,7 ^{ab}	12,2 ^b	1,8 ^{ab}	32 ^a	2,4 ^a	61 ^a	71 ^a	23 ^a	7,1 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 15. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)- ja kupari (Cu) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2016 neljännessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu
Kontrolli	1,7 ^a	41,2 ^c	11,0 ^{cd}	1,4 ^a	57 ^e	3,0 ^a	76 ^a	80 ^{abc}	40 ^{ab}	9,4 ^{a-d}
A (200)	1,9 ^{abcd}	41,2 ^c	10,8 ^{cd}	1,6 ^{a-f}	57 ^e	3,0 ^a	82 ^a	64 ^{ab}	47 ^{abc}	9,9 ^{a-e}
A (400)	2,2 ^{abcd}	39,6 ^c	8,6 ^{abc}	1,8 ^{a-g}	52 ^{bcde}	3,2 ^{ab}	84 ^a	62 ^{ab}	50 ^{abc}	13,3 ^f
B (200)	1,9 ^{abcd}	39,0 ^c	8,9 ^{abcd}	1,9 ^{a-g}	55 ^{de}	3,2 ^{ab}	82 ^a	49 ^a	46 ^{abc}	11,1 ^{a-f}
B (400)	2,3 ^{bcd}	39,0 ^c	9,2 ^{cd}	2,1 ^{c-g}	52 ^{bcde}	3,2 ^{ab}	80 ^a	82 ^{abc}	49 ^{abc}	12,2 ^{def}
C (200)	1,9 ^{abc}	38,1 ^c	10,9 ^{cd}	1,8 ^{a-g}	49 ^{bcde}	2,8 ^a	75 ^a	54 ^a	45 ^{abc}	9,7 ^{a-e}
C (400)	2,5 ^d	37,2 ^{bc}	9,9 ^{cd}	2,0 ^{b-g}	45 ^{abc}	3,2 ^{ab}	79 ^a	84 ^{abc}	41 ^{ab}	11,8 ^{def}
D (200)	1,8 ^{ab}	39,5 ^c	10,9 ^{cd}	1,7 ^{a-g}	52 ^{bcde}	3,0 ^a	80 ^a	67 ^{ab}	45 ^{abc}	9,3 ^{a-d}
D (400)	2,1 ^{abcd}	40,1 ^c	9,0 ^{bcd}	2,0 ^{c-g}	51 ^{bcde}	3,3 ^{ab}	80 ^a	110 ^{a-d}	53 ^{bc}	12,8 ^{ef}
E (200)	2,3 ^{abcd}	40,3 ^c	8,7 ^{abc}	1,8 ^{a-g}	58 ^e	3,1 ^a	84 ^a	73 ^{ab}	47 ^{abc}	11,3 ^{a-f}
E (400)	2,4 ^{cd}	37,9 ^c	8,7 ^{abc}	2,2 ^{fg}	45 ^{ab}	2,9 ^a	81 ^a	65 ^{ab}	45 ^{abc}	10,7 ^{a-f}
F (200)	2,3 ^{bcd}	38,7 ^c	8,5 ^{abc}	2,1 ^{efg}	50 ^{bcde}	3,2 ^{ab}	84 ^a	171 ^e	43 ^{abc}	11,1 ^{a-f}
F (400)	2,5 ^d	32,5 ^{ab}	9,6 ^{cd}	2,2 ^g	38 ^a	2,9 ^a	75 ^a	146 ^{de}	36 ^a	8,2 ^{ab}
G (200)	1,9 ^{abcd}	39,9 ^c	10,9 ^{cd}	1,6 ^{a-d}	57 ^e	2,9 ^a	77 ^a	56 ^a	47 ^{abc}	10,7 ^{a-f}
G (400)	1,9 ^{abcd}	39,4 ^c	9,4 ^{cd}	1,7 ^{a-g}	53 ^{bcde}	3,0 ^a	79 ^a	60 ^{ab}	48 ^{abc}	11,0 ^{a-f}
H (200)	2,1 ^{abcd}	41,0 ^c	9,7 ^{cd}	1,6 ^{a-e}	56 ^e	3,1 ^{ab}	87 ^a	133 ^{cde}	50 ^{abc}	9,5 ^{a-e}
H (400)	2,1 ^{abcd}	40,9 ^c	9,8 ^{cd}	1,7 ^{a-g}	57 ^e	3,2 ^{ab}	86 ^a	119 ^{b-e}	53 ^{bc}	10,2 ^{a-f}
I (200)	2,1 ^{abcd}	38,8 ^c	5,8 ^a	1,6 ^{a-f}	53 ^{bcde}	4,0 ^c	81 ^a	107 ^{a-d}	58 ^{cd}	11,6 ^{c-f}
I (400)	2,4 ^{bcd}	39,3 ^c	5,5 ^a	1,8 ^{a-g}	46 ^{abcd}	3,7 ^{bc}	77 ^a	71 ^{ab}	70 ^d	11,7 ^{def}
J (200) + SF (25)	2,1 ^{abcd}	40,8 ^c	10,9 ^{cd}	1,8 ^{a-g}	54 ^{bcde}	3,1 ^{ab}	90 ^a	92 ^{a-d}	50 ^{abc}	10,3 ^{a-f}
K (200) + SF (25)	2,0 ^{abcd}	39,4 ^c	8,3 ^{abc}	1,6 ^{a-d}	57 ^e	3,2 ^{ab}	85 ^a	64 ^{ab}	45 ^{abc}	10,5 ^{a-f}
SF (10)	1,7 ^a	40,5 ^c	12,1 ^d	1,5 ^{ab}	54 ^{bcde}	2,9 ^a	82 ^a	97 ^{a-d}	41 ^{ab}	8,1 ^a
SF (25)	1,8 ^{abc}	40,1 ^c	9,0 ^{bcd}	1,4 ^a	55 ^e	3,1 ^a	82 ^a	78 ^{abc}	43 ^{abc}	9,2 ^{a-d}
SF (50)	1,9 ^{abcd}	39,6 ^c	10,0 ^{cd}	1,8 ^{a-g}	54 ^{cde}	3,2 ^{ab}	88 ^a	74 ^{abc}	47 ^{abc}	11,4 ^{b-f}
SF (150)	2,1 ^{abcd}	38,0 ^c	9,8 ^{cd}	2,0 ^{c-g}	48 ^{bcde}	3,3 ^{ab}	90 ^a	91 ^{a-d}	41 ^{ab}	11,0 ^{a-f}
SF (300)	2,4 ^{bcd}	31,3 ^a	10,9 ^{cd}	1,5 ^{abc}	39 ^a	2,9 ^a	79 ^a	76 ^{abc}	34 ^a	8,3 ^{abc}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 16. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2017 ensimmäisessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli [§]	0,7	40,1	17,2	1,3	41	2,9	59	70	28	5,5	5,6
A (200)	1,5 ^a	41,8 ^b	12,8 ^{bc}	1,8 ^a	55 ^a	3,2 ^a	79 ^a	70 ^{cd}	37 ^{ab}	8,3 ^a	4,2 ^{ab}
A (400)	1,7 ^a	38,3 ^{ab}	8,9 ^{abc}	1,6 ^a	57 ^a	3,0 ^a	84 ^a	47 ^{abc}	36 ^{ab}	8,5 ^a	3,8 ^a
B (200)	1,6 ^a	36,6 ^{ab}	8,8 ^{abc}	1,8 ^a	54 ^a	3,2 ^a	74 ^a	38 ^{ab}	38 ^{ab}	8,0 ^a	5,7 ^{ab}
B (400)	1,6 ^a	40,2 ^b	10,0 ^{acb}	1,9 ^a	58 ^a	3,4 ^a	92 ^a	54 ^{a-d}	39 ^{ab}	9,4 ^a	5,5 ^{ab}
C (200)	1,7 ^a	44,5 ^b	9,2 ^{abc}	1,6 ^a	61 ^a	3,5 ^a	105 ^a	62 ^{a-d}	37 ^{ab}	8,7 ^a	4,5 ^{ab}
C (400)	1,7 ^a	37,4 ^{ab}	7,8 ^{abc}	1,8 ^a	57 ^a	3,0 ^a	75 ^a	41 ^{abc}	35 ^{ab}	8,2 ^a	4,8 ^{ab}
D (200)	1,5 ^a	42,0 ^b	11,6 ^{bc}	1,6 ^a	54 ^a	3,1 ^a	73 ^a	62 ^{a-d}	36 ^{ab}	8,4 ^a	4,5 ^{ab}
D (400)	2,1 ^a	43,8 ^b	10,4 ^{abc}	2,2 ^a	63 ^a	3,4 ^a	112 ^a	52 ^{a-d}	44 ^{ab}	9,8 ^a	4,4 ^{ab}
E (200)	2,0 ^a	41,2 ^b	9,7 ^{abc}	1,9 ^a	59 ^a	3,0 ^a	79 ^a	55 ^{a-d}	39 ^{ab}	8,5 ^a	4,4 ^{ab}
E (400)	1,7 ^a	37,7 ^{ab}	8,4 ^{abc}	1,9 ^a	58 ^a	3,2 ^a	81 ^a	52 ^{a-d}	38 ^{ab}	9,0 ^a	5,1 ^{ab}
F (200)	1,7 ^a	36,4 ^{ab}	7,7 ^{abc}	1,9 ^a	59 ^a	3,1 ^a	77 ^a	49 ^{a-d}	37 ^{ab}	8,1 ^a	5,4 ^{ab}
F (400)	1,4 ^a	26,7 ^a	7,0 ^{ab}	1,7 ^a	45 ^a	2,7 ^a	71 ^a	32 ^a	30 ^a	7,0 ^a	4,5 ^{ab}
G (200)	1,5 ^a	40,8 ^b	13,9 ^c	1,6 ^a	49 ^a	3,1 ^a	86 ^a	57 ^{a-d}	32 ^{ab}	7,9 ^a	3,9 ^a
G (400)	1,8 ^a	40,8 ^b	9,2 ^{abc}	1,9 ^a	58 ^a	3,2 ^a	100 ^a	42 ^{abc}	37 ^{ab}	9,0 ^a	5,6 ^{ab}
H (200)	1,3 ^a	38,7 ^a	12,3 ^{bc}	1,5 ^a	50 ^a	2,8 ^a	76 ^a	68 ^{bcd}	33 ^{ab}	8,1 ^a	5,1 ^{ab}
H (400)	1,4 ^a	43,0 ^b	12,6 ^{bc}	1,6 ^a	50 ^a	3,0 ^a	76 ^a	78 ^d	32 ^{ab}	8,0 ^a	5,1 ^{ab}
I (200)	1,7 ^a	40,1 ^b	6,6 ^{ab}	2,0 ^a	60 ^a	3,4 ^a	74 ^a	56 ^{a-d}	45 ^{ab}	8,5 ^a	6,3 ^{ab}
I (400)	1,6 ^a	35,7 ^{ab}	4,5 ^a	1,8 ^a	50 ^a	2,9 ^a	85 ^a	61 ^{a-d}	49 ^b	8,6 ^a	6,9 ^b
J (200) + SF (25)	1,4 ^a	37,6 ^{ab}	12,1 ^{bc}	1,5 ^a	52 ^a	2,7 ^a	81 ^a	53 ^{a-d}	30 ^a	7,6 ^a	4,3 ^{ab}
K (200) + SF (25)	1,7 ^a	42,1 ^b	12,6 ^{bc}	1,9 ^a	60 ^a	3,3 ^a	74 ^a	60 ^{a-d}	38 ^{ab}	8,9 ^a	4,0 ^{ab}
SF (10) [§]	1,1	39,2	18,7	1,5	42	2,5	64	66	26	6,2	2,9
SF (25)	1,5 ^a	41,6 ^b	10,5 ^{abc}	1,6 ^a	54 ^a	3,0 ^a	128 ^a	58 ^{a-d}	35 ^{ab}	8,4 ^a	5,1 ^{ab}
SF (50)	1,4 ^a	40,5 ^b	11,9 ^{bc}	1,5 ^a	53 ^a	3,0 ^a	75 ^a	64 ^{bcd}	33 ^{ab}	7,7 ^a	4,1 ^{ab}
SF (150)	1,6 ^a	39,0 ^{ab}	9,3 ^{abc}	1,8 ^a	61 ^a	3,1 ^a	77 ^a	44 ^{abc}	34 ^{ab}	9,5 ^a	5,8 ^{ab}
SF (300)	1,7 ^a	34,0 ^{ab}	8,2 ^{abc}	1,8 ^a	56 ^a	2,8 ^a	71 ^a	41 ^{abc}	35 ^{ab}	7,6 ^a	4,5 ^{ab}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti. [§]Pienestä kuiva-ainesadosta johtuen kaikki neljä rinnakaista yhdistettiin yhdeksi näytteeksi.

Liite 17. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2017 toisessa niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli [§]	1,9	54,4	13,0	2,0	64	4,0	75	85	43	10,6	7,6
A (200)	2,1 ^{ab}	47,4 ^e	11,8 ^{def}	2,3 ^{ab}	69 ^{de}	3,8 ^{cde}	108 ^{bc}	92 ^{ab}	44 ^{cd}	11,5 ^{bc}	4,8 ^a
A (400)	2,0 ^{ab}	43,7 ^e	10,4 ^{a-f}	2,1 ^{ab}	69 ^{de}	3,4 ^{a-e}	95 ^{abc}	74 ^a	40 ^{bcd}	11,7 ^{bc}	5,8 ^{ab}
B (200)	2,0 ^{ab}	37,1 ^{cde}	8,7 ^{a-e}	2,3 ^{ab}	65 ^{cde}	3,2 ^{a-d}	85 ^{abc}	58 ^a	40 ^{bcd}	10,8 ^b	7,1 ^{abc}
B (400)	2,2 ^{ab}	40,2 ^{de}	8,5 ^{a-e}	2,3 ^{ab}	66 ^{cde}	3,5 ^{b-e}	82 ^{abc}	59 ^a	39 ^{bcd}	11,5 ^{bc}	7,1 ^{abc}
C (200)	1,7 ^a	40,9 ^{de}	9,0 ^{a-f}	1,9 ^{ab}	62 ^{cde}	3,3 ^{a-e}	76 ^{ab}	67 ^a	40 ^{bcd}	10,5 ^b	5,4 ^{ab}
C (400)	2,1 ^{ab}	25,8 ^{abc}	7,8 ^{a-d}	1,9 ^{ab}	45 ^{ab}	2,9 ^{ab}	63 ^a	62 ^a	28 ^{abc}	9,0 ^{ab}	5,2 ^{ab}
D (200)	1,8 ^a	43,6 ^e	11,2 ^{c-f}	2,1 ^{ab}	61 ^{bcd}	3,5 ^{b-e}	89 ^{abc}	79 ^a	42 ^{cd}	10,3 ^b	5,4 ^{ab}
D (400)	2,2 ^{ab}	41,1 ^{de}	10,0 ^{a-f}	2,6 ^{ab}	58 ^{abcd}	3,1 ^{a-d}	77 ^{ab}	62 ^a	44 ^{cd}	11,4 ^{bc}	5,8 ^{ab}
E (200)	2,0 ^{ab}	39,2 ^{de}	10,3 ^{a-f}	1,9 ^{ab}	59 ^{abcd}	3,3 ^{a-d}	81 ^{ab}	82 ^{ab}	42 ^{cd}	10,8 ^b	5,7 ^{ab}
E (400)	2,2 ^{ab}	28,9 ^{a-d}	6,9 ^{ab}	1,9 ^{ab}	56 ^{abcd}	3,0 ^{abc}	68 ^a	60 ^a	33 ^{abc}	9,5 ^{ab}	6,2 ^{ab}
F (200)	2,4 ^{ab}	35,5 ^{b-e}	8,0 ^{a-d}	2,4 ^{ab}	62 ^{cde}	3,3 ^{a-d}	71 ^a	76 ^a	40 ^{bcd}	11,3 ^{bc}	6,8 ^{abc}
F (400)	2,3 ^{ab}	20,3 ^a	7,2 ^{abc}	1,7 ^{ab}	43 ^a	2,6 ^a	60 ^a	55 ^a	21 ^a	6,5 ^a	5,1 ^{ab}
G (200)	2,2 ^{ab}	47,1 ^e	12,3 ^{ef}	2,1 ^{ab}	69 ^{de}	3,9 ^{def}	81 ^{abc}	88 ^{ab}	51 ^{de}	11,7 ^{bc}	5,2 ^{ab}
G (400)	1,9 ^{ab}	43,4 ^e	10,0 ^{a-f}	2,3 ^{ab}	70 ^{de}	3,3 ^{a-e}	77 ^{ab}	62 ^a	40 ^{bcd}	10,6 ^b	6,0 ^{ab}
H (200)	1,9 ^{ab}	45,5 ^e	12,6 ^{ef}	1,9 ^{ab}	65 ^{cde}	3,7 ^{b-e}	117 ^c	91 ^{ab}	45 ^{cd}	10,7 ^b	5,5 ^{ab}
H (400)	1,7 ^a	44,2 ^e	10,9 ^{b-f}	1,7 ^a	65 ^{cde}	3,5 ^{b-e}	82 ^{abc}	89 ^{ab}	43 ^{cd}	10,4 ^b	5,7 ^{ab}
I (200)	2,0 ^{ab}	43,4 ^e	7,8 ^{a-d}	2,4 ^{ab}	69 ^{cde}	4,1 ^{ef}	81 ^{ab}	94 ^{ab}	53 ^{de}	11,1 ^{bc}	9,7 ^c
I (400)	2,7 ^b	44,2 ^e	6,8 ^a	2,7 ^b	77 ^e	4,6 ^f	93 ^{abc}	133 ^b	67 ^e	14,0 ^c	13,1 ^d
J (200) + SF (25)	2,2 ^{ab}	45,2 ^e	13,0 ^f	2,1 ^{ab}	68 ^{cde}	3,8 ^{cde}	85 ^{abc}	88 ^{ab}	43 ^{cd}	10,3 ^b	5,7 ^{ab}
K (200) + SF (25)	2,1 ^{ab}	45,4 ^e	11,3 ^{c-f}	2,3 ^{ab}	69 ^{de}	3,8 ^{cde}	78 ^{ab}	73 ^a	44 ^{cd}	10,3 ^b	5,0 ^{ab}
SF (10) [§]	1,5	46,1	16,0	1,7	57	3,5	80	90	33	7,6	3,9
SF (25)	1,6 ^a	44,0 ^e	10,4 ^{a-f}	1,7 ^{ab}	64 ^{cde}	3,4 ^{a-e}	71 ^a	75 ^a	40 ^{bcd}	9,2 ^{ab}	5,5 ^{ab}
SF (50)	1,9 ^a	44,3 ^e	11,4 ^{def}	1,9 ^{ab}	65 ^{cde}	3,6 ^{b-e}	84 ^{abc}	70 ^a	41 ^{bcd}	8,8 ^{ab}	4,9 ^{ab}
SF (150)	2,1 ^{ab}	39,0 ^{cde}	8,6 ^{a-e}	2,4 ^{ab}	69 ^{de}	3,6 ^{b-e}	74 ^{ab}	63 ^a	38 ^{a-d}	10,6 ^b	8,0 ^{bc}
SF (300)	2,2 ^{ab}	22,7 ^{ab}	7,8 ^{a-d}	1,7 ^a	52 ^{abc}	2,6 ^a	61 ^a	51 ^a	24 ^{ab}	6,9 ^a	4,5 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Määdä, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G:

Pyrolysoitu mädä, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädä, HSY + SF

(25). SF = superfosfaatti. §Pienestä kuiva-ainesadosta johtuen kaikki neljä rinnakaista yhdistettiin yhdeksi näytteeksi.

Liite 18. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuoden 2017 kolmannessa neljänneksessä. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli ⁵	0,8 ^a	27,1 ^{b-e}	11,9 ^e	1,2 ^a	39 ^{a-f}	1,9 ^a	96 ^d	75 ^a	30 ^{a-d}	7,5 ^{b-e}	3,2 ^{abc}
A (200)	1,4 ^{a-d}	33,3 ^{de}	10,4 ^{cde}	1,7 ^{abc}	47 ^{def}	2,6 ^{abc}	81 ^d	66 ^a	35 ^{cd}	9,4 ^{de}	3,1 ^{abc}
A (400)	1,5 ^{b-f}	25,6 ^{a-e}	9,1 ^{cde}	1,8 ^{bc}	44 ^{b-f}	3,0 ^{bc}	62 ^{a-d}	73 ^a	35 ^{cd}	8,8 ^{de}	3,8 ^{abc}
B (200)	1,5 ^{b-f}	22,2 ^{a-e}	8,9 ^{cde}	1,7 ^{abc}	38 ^{a-f}	2,6 ^{abc}	50 ^{a-d}	56 ^a	29 ^{a-d}	7,3 ^{a-e}	4,5 ^{a-d}
B (400)	1,4 ^{bcd}	22,7 ^{a-e}	9,5 ^{cde}	1,9 ^c	34 ^{a-e}	2,7 ^{abc}	51 ^{a-d}	52 ^a	29 ^{a-d}	8,0 ^{cde}	4,1 ^{a-d}
C (200)	1,6 ^{c-f}	32,9 ^{de}	8,4 ^{bc}	1,9 ^c	48 ^{def}	3,0 ^c	63 ^{a-d}	74 ^a	37 ^{cd}	9,8 ^e	5,1 ^{cd}
C (400)	1,9 ^{ef}	14,6 ^{ab}	12,0 ^e	1,6 ^{abc}	26 ^a	2,8 ^{abc}	34 ^{ab}	94 ^a	19 ^{ab}	4,5 ^a	2,5 ^{ab}
D (200)	1,3 ^{abc}	33,2 ^{de}	8,9 ^{b-e}	1,7 ^{abc}	47 ^{def}	2,8 ^{abc}	59 ^{a-d}	59 ^a	33 ^{bcd}	8,9 ^{de}	4,9 ^{bcd}
D (400)	1,5 ^{b-f}	27,5 ^{b-e}	9,5 ^{cde}	1,9 ^c	39 ^{a-f}	2,5 ^{abc}	61 ^{a-d}	53 ^a	31 ^{bcd}	8,6 ^{de}	4,1 ^{a-d}
E (200)	1,7 ^{def}	28,7 ^{cde}	9,0 ^{cde}	1,8 ^{bc}	44 ^{def}	2,8 ^{abc}	58 ^{a-d}	63 ^a	33 ^{bcd}	7,8 ^{b-e}	4,3 ^{a-d}
E (400)	2,0 ^f	15,0 ^{ab}	9,8 ^{cde}	1,5 ^{abc}	33 ^{a-d}	2,5 ^{abc}	54 ^{a-d}	82 ^a	25 ^{abc}	5,5 ^{abc}	3,9 ^{abc}
F (200)	2,0 ^{ef}	17,6 ^{abc}	8,9 ^{b-e}	1,7 ^{abc}	38 ^{a-f}	2,9 ^{bc}	43 ^{abc}	72 ^a	30 ^{a-d}	6,7 ^{a-d}	3,7 ^{abc}
F (400)	2,5 ^g	14,3 ^a	11,7 ^{de}	1,8 ^c	28 ^{ab}	3,2 ^c	34 ^{ab}	102 ^a	20 ^{ab}	4,8 ^{ab}	4,1 ^{a-d}
G (200)	1,4 ^{a-d}	34,5 ^e	10,3 ^{cde}	1,6 ^{abc}	50 ^f	2,8 ^{abc}	69 ^{cd}	60 ^a	36 ^{cd}	9,2 ^{de}	3,2 ^{abc}
G (400)	1,4 ^{a-d}	33,3 ^{de}	9,1 ^{cde}	1,8 ^{abc}	50 ^f	2,8 ^{abc}	67 ^{bcd}	55 ^a	34 ^{bcd}	9,2 ^{de}	5,1 ^{cd}
H (200)	1,3 ^{a-d}	33,5 ^{de}	9,8 ^{cde}	1,6 ^{abc}	43 ^{b-f}	2,5 ^{abc}	68 ^{cd}	89 ^a	37 ^{cd}	8,3 ^{cde}	3,7 ^{abc}
H (400)	1,2 ^{a-d}	34,1 ^{de}	8,9 ^{b-e}	1,5 ^{abc}	41 ^{a-f}	2,5 ^{abc}	63 ^{a-d}	107 ^a	35 ^{cd}	7,9 ^{b-e}	4,0 ^{a-d}
I (200)	1,5 ^{b-f}	33,7 ^{de}	5,6 ^{ab}	1,9 ^c	45 ^{def}	3,3 ^c	69 ^{cd}	67 ^a	42 ^d	9,1 ^{de}	6,4 ^d
I (400)	1,5 ^{b-f}	20,9 ^{a-d}	3,8 ^a	1,4 ^{abc}	33 ^{a-d}	2,7 ^{abc}	49 ^{a-d}	81 ^a	34 ^{bcd}	6,9 ^{a-e}	5,1 ^{cd}
J (200) + SF (25)	1,4 ^{a-d}	35,1 ^e	7,8 ^{bc}	1,4 ^{abc}	44 ^{b-f}	2,5 ^{abc}	63 ^{a-d}	63 ^a	30 ^{a-d}	7,2 ^{a-e}	3,5 ^{abc}
K (200) + SF (25)	1,1 ^{ab}	32,3 ^{de}	8,7 ^{bcd}	1,6 ^{abc}	43 ^{b-f}	2,4 ^{abc}	62 ^{a-d}	50 ^a	29 ^{a-d}	7,3 ^{a-e}	3,6 ^{abc}
SF (10)	0,9 ^a	33,7 ^{de}	12,0 ^e	1,2 ^{ab}	39 ^{a-f}	2,0 ^a	65 ^{a-d}	82 ^a	26 ^{abc}	6,9 ^{a-e}	2,2 ^a
SF (25)	1,1 ^{ab}	32,7 ^{de}	8,8 ^{b-e}	1,5 ^{abc}	44 ^{def}	2,5 ^{abc}	64 ^{a-d}	69 ^a	31 ^{bcd}	7,6 ^{b-e}	3,7 ^{abc}
SF (50)	1,1 ^{abc}	33,6 ^{de}	8,3 ^{bc}	1,6 ^{abc}	43 ^{b-f}	2,6 ^{abc}	70 ^{cd}	65 ^a	32 ^{bcd}	7,8 ^{b-e}	3,9 ^{abc}
SF (150)	1,1 ^{ab}	15,7 ^{abc}	8,0 ^{bc}	1,2 ^a	29 ^{abc}	2,1 ^{ab}	38 ^{abc}	34 ^a	20 ^{ab}	5,3 ^{abc}	3,0 ^{abc}
SF (300)	1,7 ^{def}	13,8 ^a	10,4 ^{cde}	1,4 ^{abc}	27 ^a	2,6 ^{abc}	43 ^{abc}	56 ^a	16 ^a	4,4 ^a	2,8 ^{abc}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mäddäte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti. ⁵Pienestä kuiva-ainesadosta johtuen kaikki neljä rinnakkaista yhdistettiin yhdeksi näytteeksi.

Liite 19. Raiheinän kadmium (Cd)-, lyijy (Pb)-, nikkeli (Ni)-, arseeni (As)- ja kromi (Cr) -pitoisuudet ($\mu\text{g kg}^{-1}$) vuoden 2015 ensimmäisessä ja toisessa niitossa. Eri kirjaimilla merkityt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$). Määrittysrajat As- ja Cr-pitoisuuksille 30 ja $300 \mu\text{g kg}^{-1}$.

	Vuoden 2015 ensimmäinen niitto					Vuoden 2015 toinen niitto				
	Cd	Pb	Ni	As	Cr	Cd	Pb	Ni	As	Cr
Kontrolli	111 ^{abcde}	82 ^a	365 ^{ab}	37	<300	137 ^{abcde}	51 ^a	324 ^a	31	362 ^{ab}
A (200)	110 ^{abcde}	57 ^a	339 ^a	32	<300	151 ^{bcde}	113 ^a	436 ^{ab}	31	386 ^{ab}
A (400)	113 ^{abcde}	51 ^a	361 ^{ab}	<30	<300	148 ^{bcde}	75 ^a	409 ^{ab}	31	436 ^{ab}
B (200)	110 ^{abcde}	96 ^a	417 ^{ab}	<30	<300	97 ^{abc}	51 ^a	370 ^a	<30	384 ^{ab}
B (400)	106 ^{abcde}	52 ^a	334 ^a	<30	<300	115 ^{abcde}	98 ^a	439 ^{ab}	<30	420 ^{ab}
C (200)	86 ^{abc}	101 ^a	346 ^{ab}	<30	<300	105 ^{abcde}	69 ^a	390 ^a	<30	345 ^{ab}
C (400)	87 ^{abc}	64 ^a	417 ^{ab}	30	<300	107 ^{abcde}	37 ^a	428 ^{ab}	<30	343 ^{ab}
D (200)	111 ^{abcde}	41 ^a	342 ^{ab}	<30	<300	173 ^e	116 ^a	402 ^{ab}	<30	467 ^{ab}
D (400)	111 ^{abcde}	81 ^a	438 ^{ab}	<30	<300	132 ^{abcde}	87 ^a	405 ^{ab}	<30	453 ^{ab}
E (200)	106 ^{abcde}	133 ^a	341 ^a	<30	<300	98 ^{abc}	69 ^a	372 ^a	<30	437 ^{ab}
E (400)	111 ^{abcde}	83 ^a	281 ^a	<30	<300	102 ^{abcd}	41 ^a	327 ^a	<30	393 ^{ab}
F (200)	102 ^{abcde}	50 ^a	384 ^{ab}	<30	<300	100 ^{abcd}	75 ^a	441 ^{ab}	<30	469 ^{ab}
F (400)	86 ^{ab}	96 ^a	438 ^{ab}	<30	<300	85 ^{ab}	75 ^a	500 ^{ab}	38	533 ^b
G (200)	108 ^{abcde}	47 ^a	325 ^a	<30	<300	137 ^{abcde}	104 ^a	344 ^a	<30	383 ^{ab}
G (400)	95 ^{abcde}	53 ^a	357 ^{ab}	34	<300	132 ^{abcde}	79 ^a	348 ^a	<30	419 ^{ab}
H (200)	120 ^{de}	79 ^a	575 ^b	<30	<300	154 ^{bcde}	44 ^a	448 ^{ab}	38	420 ^{ab}
H (400)	102 ^{abcde}	91 ^a	420 ^{ab}	<30	<300	139 ^{abcde}	78 ^a	500 ^{ab}	30	493 ^{ab}
I (200)	91 ^{abcd}	76 ^a	311 ^a	<30	<300	113 ^{abcde}	40 ^a	340 ^a	<30	502 ^{ab}
I (400)	82 ^a	39 ^a	250 ^a	<30	<300	74 ^a	60 ^a	349 ^a	31	402 ^{ab}
J (200) + SF (25)	120 ^{de}	46 ^a	309 ^a	<30	<300	158 ^{cde}	88 ^a	433 ^{ab}	<30	349 ^{ab}
K (200) + SF (25)	117 ^{de}	40 ^a	251 ^a	<30	<300	168 ^{de}	56 ^a	411 ^{ab}	32	320 ^a
SF (10)	116 ^{bcde}	68 ^a	263 ^a	<30	<300	139 ^{abcde}	37 ^a	358 ^a	<30	498 ^{ab}
SF (25)	121 ^{de}	79 ^a	296 ^a	34	<300	155 ^{bcde}	46 ^a	438 ^{ab}	<30	335 ^{ab}
SF (50)	125 ^e	38 ^a	335 ^a	<30	<300	139 ^{abcde}	73 ^a	461 ^{ab}	<30	395 ^{ab}
SF (150)	113 ^{abcde}	83 ^a	386 ^{ab}	<30	<300	106 ^{abcde}	65 ^a	574 ^b	35	360 ^{ab}
SF (300)	116 ^{bcde}	69 ^a	471 ^{ab}	<30	<300	108 ^{abcde}	52 ^a	500 ^{ab}	<30	412 ^{ab}

*A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mäddäte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25), SF = superfosfaatti.

Liite 20. Raiheinän kadmium (Cd)-, lyijy (Pb)-, nikkeli (Ni)-, arseeni (As)- ja kromi (Cr) -pitoisuudet ($\mu\text{g kg}^{-1}$) vuoden 2015 kolmannessa ja neljännessä sekä vuoden 2016 ensimmäisessä niitossa. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$). Määrittäysrajat As- ja Cr-pitoisuuksille 30 ja $300 \mu\text{g kg}^{-1}$.

Vuoden 2015 kolmas niitto						Vuoden 2015 neljäs niitto						Vuoden 2016 ensimmäinen niitto					
Käsittely#	Cd	Pb	Ni	As	Cr	Cd	Pb	Ni	As	Cr	Cd	Pb	Ni	As			
Kontrolli	192 ^{cde}	49 ^{ab}	468 ^{de}	<30	586 ^{bcd}	171 ^{a-f}	55 ^a	405 ^{ab}	43	634 ^{ab}	146 ^{cd}	28 ^a	211 ^a	<30			
A (200)	187 ^{b-e}	207 ^b	403 ^{a-e}	32	550 ^{a-d}	183 ^{a-f}	65 ^{ab}	410 ^{ab}	40	626 ^{ab}	108 ^{abc}	27 ^a	213 ^{ab}	<30			
A (400)	185 ^{a-e}	72 ^{ab}	404 ^{b-e}	<30	574 ^{bcd}	184 ^{a-f}	111 ^{ab}	440 ^{ab}	53	700 ^{ab}	109 ^{a-d}	59 ^a	206 ^a	<30			
B (200)	123 ^a	57 ^{ab}	371 ^{a-e}	<30	598 ^{cd}	119 ^a	84 ^{ab}	440 ^{ab}	58	785 ^{ab}	123 ^{a-d}	48 ^a	209 ^a	<30			
B (400)	131 ^{abc}	50 ^{ab}	389 ^{a-e}	<30	537 ^{a-d}	130 ^{abc}	85 ^{ab}	450 ^{ab}	33	779 ^{ab}	109 ^{abc}	37 ^a	215 ^{ab}	<30			
C (200)	164 ^{a-e}	58 ^{ab}	422 ^{a-e}	45	476 ^{a-d}	168 ^{a-f}	75 ^{ab}	468 ^{ab}	38	723 ^{ab}	130 ^{a-d}	53 ^a	270 ^{ab}	<30			
C (400)	166 ^{a-e}	64 ^{ab}	500 ^e	43	525 ^{a-d}	175 ^{a-f}	101 ^{ab}	535 ^{ab}	37	577 ^{ab}	112 ^{a-d}	47 ^a	214 ^{ab}	<30			
D (200)	159 ^{a-e}	59 ^{ab}	395 ^{a-e}	32	536 ^{a-d}	164 ^{a-f}	89 ^{ab}	535 ^{ab}	32	704 ^{ab}	126 ^{a-d}	35 ^a	250 ^{ab}	<30			
D (400)	176 ^{a-e}	64 ^{ab}	656 ^f	43	472 ^{a-d}	154 ^{a-f}	70 ^{ab}	598 ^{ab}	34	782 ^{ab}	121 ^{a-d}	42 ^a	263 ^{ab}	40			
E (200)	132 ^{abc}	70 ^{ab}	342 ^{a-d}	34	628 ^d	145 ^{a-e}	102 ^{ab}	428 ^{ab}	40	733 ^{ab}	138 ^{bcd}	36 ^a	227 ^{ab}	<30			
E (400)	133 ^{abc}	68 ^{ab}	341 ^{a-d}	35	554 ^{a-d}	135 ^{abc}	112 ^{ab}	445 ^{ab}	32	695 ^{ab}	110 ^{a-d}	63 ^a	219 ^{ab}	35			
F (200)	123 ^a	85 ^{ab}	450 ^{b-e}	30	503 ^{a-d}	144 ^{a-d}	113 ^{ab}	533 ^{ab}	30	728 ^{ab}	102 ^{ab}	43 ^a	206 ^a	<30			
F (400)	138 ^{a-d}	82 ^{ab}	499 ^e	<30	585 ^{bcd}	151 ^{a-e}	101 ^{ab}	518 ^{ab}	36	950 ^b	88 ^a	81 ^a	216 ^{ab}	33			
G (200)	172 ^{a-e}	69 ^{ab}	347 ^{a-d}	<30	508 ^{a-d}	139 ^{abc}	87 ^{ab}	418 ^{ab}	<30	676 ^{ab}	129 ^{a-d}	58 ^a	229 ^{ab}	<30			
G (400)	136 ^{a-d}	50 ^{ab}	297 ^a	<30	569 ^{bcd}	122 ^{ab}	81 ^{ab}	433 ^{ab}	39	727 ^{ab}	116 ^{a-d}	67 ^a	200 ^a	<30			
H (200)	189 ^{b-e}	68 ^{ab}	458 ^{cde}	30	476 ^{a-d}	211 ^{d-g}	102 ^{ab}	650 ^{ab}	<30	876 ^{ab}	140 ^{bcd}	37 ^a	204 ^a	<30			
H (400)	204 ^e	41 ^a	407 ^{a-e}	38	477 ^{a-d}	253 ^g	126 ^{ab}	623 ^{ab}	<30	880 ^{ab}	135 ^{bcd}	50 ^a	326 ^{ab}	<30			
I (200)	157 ^{a-e}	48 ^{ab}	300 ^{ab}	42	455 ^{a-d}	160 ^{a-f}	100 ^{ab}	400 ^a	<30	576 ^{ab}	134 ^{bcd}	52 ^a	203 ^a	33			
I (400)	145 ^{a-e}	48 ^{ab}	281 ^a	37	374 ^{ab}	212 ^{e-f-g}	153 ^{ab}	385 ^a	35	741 ^{ab}	117 ^{a-d}	41 ^a	169 ^a	<30			
J	178 ^{a-e}	55 ^{ab}	335 ^{a-d}	31	384 ^{abc}	192 ^{c-g}	195 ^b	448 ^{ab}	35	656 ^{ab}	112 ^{a-d}	42 ^a	233 ^{ab}	<30			
K	195 ^{de}	54 ^{ab}	315 ^{abc}	44	503 ^{a-d}	168 ^{a-f}	153 ^{ab}	518 ^{ab}	40	718 ^{ab}	131 ^{a-d}	38 ^a	209 ^a	<30			
SF (10)	184 ^{a-e}	51 ^{ab}	310 ^{abc}	<30	402 ^{abc}	220 ^{fg}	116 ^{ab}	478 ^{ab}	31	659 ^{ab}	122 ^{a-d}	37 ^a	236 ^{ab}	<30			
SF (25)	188 ^{b-e}	33 ^a	285 ^a	33	424 ^{a-d}	187 ^{b-g}	117 ^{ab}	423 ^{ab}	37	515 ^a	136 ^{bcd}	40 ^a	235 ^{ab}	<30			
SF (50)	175 ^{a-e}	29 ^a	314 ^{abc}	33	333 ^a	169 ^{a-f}	132 ^{ab}	433 ^{ab}	37	628 ^{ab}	133 ^{bcd}	40 ^a	219 ^{ab}	<30			
SF (150)	183 ^{a-e}	34 ^a	350 ^{a-e}	38	405 ^{a-d}	173 ^{a-f}	120 ^{ab}	470 ^{ab}	49	617 ^{ab}	153 ^d	43 ^a	217 ^{ab}	<30			
SF (300)	128 ^{ab}	49 ^{ab}	384 ^{a-e}	46	432 ^{a-d}	142 ^{abc}	127 ^{ab}	670 ^b	41	497 ^a	119 ^{a-d}	50 ^a	378 ^b	35			

[#]A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mäddäte, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädäte, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Saksasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädäte, HSY + SF (25), SF = superfosfaatti.

Liite 21. Ohran sato (g astia⁻¹), satoindeksit (SI), tuhannen siemenen paino (tsp, g) ja tyypin (N) ja fosforin (P) perustetuissa koejäsenissä vuosina 2016–2017. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Vuosi 2016								Vuosi 2017								Σ _{jyväsato}
	jyväsato	olki-sato	SI	tsp	N, jyvät	N, oljet	P, jyvät	P, oljet	jyväsato	olki-sato	SI	tsp	N, jyvät	N, oljet	P, jyvät	P, oljet	
Kontrolli#	13,0 ^a	17,1 ^a	42,2 ^a	18,8 ^a	30,2 ^b	23,4 ^c	3,1 ^c	0,8 ^b	4,7 ^a	7,8 ^a	37,8 ^a	19,3 ^a	27,3 ^b	20,3 ^b	3,3 ^{ab}	1,0 ^a	17,7
L (200)	67,1 ^c	28,3 ^b	70,3 ^b	35,4 ^c	23,4 ^a	10,0 ^b	2,7 ^{bc}	0,4 ^a	12,4 ^b	15,7 ^b	44,1 ^{ab}	23,5 ^{ab}	25,9 ^{ab}	20,2 ^b	3,6 ^b	1,1 ^a	79,5
SF (10)	26,1 ^b	18,5 ^a	58,4 ^b	30,6 ^b	29,2 ^b	21,4 ^c	2,9 ^c	0,5 ^a	13,1 ^b	14,1 ^{ab}	48,2 ^{abc}	23,6 ^{ab}	26,0 ^{ab}	19,2 ^{ab}	2,8 ^a	0,7 ^a	39,2
SF (50)	63,0 ^c	29,3 ^b	68,2 ^b	42,6 ^d	25,2 ^a	11,5 ^b	1,9 ^a	0,4 ^a	18,2 ^{bc}	12,5 ^{ab}	58,6 ^c	25,5 ^b	25,2 ^a	17,2 ^{ab}	3,3 ^{ab}	0,7 ^a	81,2
SF (150)	92,3 ^d	43,0 ^c	68,2 ^b	49,1 ^e	23,3 ^a	5,9 ^a	2,4 ^b	0,5 ^a	23,3 ^c	18,6 ^b	56,1 ^{bc}	27,3 ^b	24,4 ^a	15,9 ^a	3,4 ^{ab}	0,8 ^a	115,6

#L: Jätevesilietteen tuhka 3 (peräisin Saksasta), SF = superfosfaatti.

Liite 22. Ohran jyväsato ja olkisatojen kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S)- ja rauta (Fe)- ja sinkki (Zn)-, kupari (Cu) - ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2016 perustetuissa koejäsenissä vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Ca		Mg		K		S		Fe		Mn		Zn		Cu		Mo
	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	olki
Kontrolli#	0,6 ^b	7,2 ^a	1,2 ^{ab}	1,5 ^a	11,9 ^d	66 ^c	1,9 ^b	4,6 ^a	41 ^b	60 ^a	21 ^d	86 ^{ab}	88 ^c	112 ^b	7,9 ^b	6,5 ^c	3,2 ^a
L (200)	0,4 ^a	9,4 ^a	1,2 ^{ab}	1,8 ^{ab}	8,3 ^b	60 ^b	1,5 ^a	5,5 ^{bc}	28 ^a	40 ^a	14 ^a	62 ^a	65 ^b	90 ^b	8,0 ^c	5,1 ^b	9,0 ^b
SF (10)	0,4 ^a	10,0 ^a	1,2 ^{ab}	1,7 ^{ab}	9,8 ^c	64 ^{bc}	1,8 ^b	6,0 ^c	34 ^{ab}	45 ^a	20 ^{cd}	163 ^d	74 ^b	95 ^b	6,7 ^{bc}	4,6 ^b	4,0 ^a
SF (50)	0,3 ^a	13,8 ^b	1,1 ^a	2,0 ^b	6,2 ^a	52 ^b	1,5 ^a	4,2 ^{ab}	29 ^a	76 ^a	16 ^{ab}	121 ^c	46 ^a	31 ^a	4,6 ^a	2,6 ^a	3,7 ^a
SF (150)	0,4 ^a	13,7 ^b	1,3 ^b	2,6 ^c	5,4 ^a	45 ^a	1,5 ^a	3,5 ^a	29 ^{ab}	39 ^a	18 ^{bc}	115 ^{bc}	45 ^a	20 ^a	4,2 ^a	1,8 ^a	2,5 ^a

#L: Jätevesilietteen tuhka 3 (peräisin Saksasta), SF = superfosfaatti.

Liite 23. Ohran jyväsato ja olkisatojen kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K), rikki (S) (g kg⁻¹) ja rauta (Fe)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu) - ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2016 perustetuissa koejäsenissä vuonna 2017. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Ca		Mg		K		S		Fe		Mn		Zn		Cu		Mo
	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	jyväs	olki	olki
Kontrolli#	0,6 ^a	9,7 ^a	1,3 ^a	2,1 ^a	15,4 ^a	65 ^a	2,0 ^a	5,9 ^a	32 ^a	51 ^b	18 ^a	134 ^a	65 ^{ab}	87 ^b	7,5 ^a	6,5 ^a	7,6 ^a
L (200)	0,7 ^a	12,0 ^a	1,4 ^a	2,5 ^a	14,1 ^a	64 ^a	2,0 ^a	5,5 ^a	37 ^a	36 ^a	20 ^a	112 ^a	74 ^b	86 ^b	7,6 ^a	6,6 ^a	6,1 ^a
SF (10)	1,2 ^a	12,0 ^a	1,2 ^a	2,0 ^a	14,1 ^a	66 ^a	2,0 ^a	5,4 ^a	26 ^a	36 ^a	20 ^a	122 ^a	62 ^a	62 ^a	6,6 ^a	5,3 ^a	7,4 ^a
SF (50)	0,5 ^a	8,9 ^a	1,4 ^a	2,0 ^a	14,2 ^a	67 ^a	2,0 ^a	7,0 ^a	34 ^a	37 ^{ab}	19 ^a	121 ^a	65 ^{ab}	75 ^{ab}	7,1 ^a	5,6 ^a	9,6 ^b
SF (150)	0,6 ^a	11,8 ^a	1,4 ^a	2,3 ^a	12,6 ^a	60 ^a	1,9 ^a	6,5 ^a	26 ^a	38 ^{ab}	20 ^a	119 ^a	63 ^a	68 ^{ab}	7,3 ^a	5,5 ^a	7,0 ^a

#L: Jätevesilietteen tuhka 3 (peräisin Saksasta), SF = superfosfaatti.

Liite 26. Raiheinäsatojen tyyppi (N)-, fosfori (P)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S) (g kg⁻¹)- ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)-, molybdeeni (Mo)-, kadmium (Cd)-, lyijy (Pb)-, nikkeli (Ni)- ja arseeni (As) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) vuonna 2016 perustetuissa superfosfaatti (SF) -koejäsensissä vuosina 2016 (niitot 1–4) ja 2017 (niitot 5–7). Numero SF-käsittelyssä merkitsee fosforilisää (mg kg⁻¹ maata) Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05). Niitot testattu erikseen.

Käsittely [#]	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	Cd	Pb	Ni	As
1. niitto, kontrolli	44,3 ^c	1,5 ^b	6,9 ^a	2,1 ^b	60 ^c	3,6 ^c	75 ^b	87 ^c	42 ^c	9,0 ^c	3,1 ^b	135 ^c	51 ^a	284 ^b	<30
SF (25)	34,6 ^b	0,9 ^a	7,3 ^a	1,7 ^a	40 ^b	2,1 ^b	69 ^{ab}	59 ^b	26 ^b	5,1 ^b	2,9 ^b	110 ^b	84 ^a	210 ^a	<30
SF (150)	16,6 ^a	1,0 ^a	7,2 ^a	1,6 ^a	24 ^a	1,4 ^a	51 ^a	42 ^a	20 ^a	3,7 ^a	1,6 ^a	93 ^{ab}	73 ^a	240 ^{ab}	<30
SF (300)	15,2 ^a	1,4 ^b	7,2 ^a	1,8 ^a	22 ^a	1,4 ^a	53 ^a	47 ^{ab}	19 ^a	3,6 ^a	1,2 ^a	81 ^a	67 ^a	247 ^{ab}	<30
2. niitto, kontrolli	37,6 ^c	1,5 ^a	6,5 ^a	2,0 ^a	62 ^c	2,9 ^b	38 ^c	74 ^a	38 ^c	9,6 ^b					
SF (25)	33,1 ^b	1,9 ^b	7,8 ^b	3,3 ^b	46 ^b	3,1 ^b	32 ^b	67 ^a	32 ^b	10,5 ^b					
SF (150)	24,0 ^a	1,9 ^b	7,7 ^b	2,1 ^a	28 ^a	2,2 ^a	25 ^a	72 ^a	25 ^a	6,1 ^a					
SF (300)	22,2 ^a	2,6 ^c	8,4 ^b	2,1 ^a	28 ^a	2,3 ^a	23 ^a	82 ^a	23 ^a	5,6 ^a					
3. niitto, kontrolli	42,0 ^c	1,7 ^{ab}	10,5 ^a	2,1 ^{ab}	60 ^c	4,0 ^c	88 ^c	135 ^a	48 ^c	10,7 ^c					
SF (25)	30,7 ^b	1,5 ^a	10,3 ^a	2,5 ^b	41 ^b	3,6 ^b	75 ^b	82 ^a	30 ^b	8,8 ^b					
SF (150)	23,8 ^a	1,9 ^b	10,8 ^a	1,8 ^a	31 ^a	2,5 ^a	63 ^a	121 ^a	23 ^a	6,4 ^a					
SF (300)	23,8 ^a	2,5 ^c	11,2 ^a	1,9 ^{ab}	31 ^a	2,7 ^a	57 ^a	100 ^a	22 ^a	5,8 ^a					
4. niitto, kontrolli	40,2 ^b	1,7 ^a	8,8 ^a	1,9 ^b	52 ^c	3,5 ^b	116 ^a	130 ^a	50 ^b	10,2 ^b					
SF (25)	38,2 ^b	1,6 ^a	9,4 ^{ab}	1,9 ^b	48 ^b	3,8 ^b	96 ^a	97 ^a	37 ^a	9,1 ^b					
SF (150)	32,3 ^a	2,0 ^b	10,7 ^b	1,5 ^a	40 ^a	2,9 ^a	84 ^a	142 ^a	33 ^a	6,8 ^a					
SF (300)	32,0 ^a	2,5 ^c	10,8 ^b	1,5 ^a	37 ^a	2,9 ^a	83 ^a	119 ^a	31 ^a	6,3 ^a					
5. niitto, kontrolli	42,5 ^c	1,6 ^b	9,4 ^a	1,9 ^a	60 ^c	3,6 ^b	122 ^b	56 ^b	42 ^b	8,6 ^c	7,0 ^b				
SF (25)	37,2 ^{bc}	1,3 ^{ab}	7,8 ^a	1,7 ^a	53 ^{bc}	3,2 ^b	78 ^{ab}	40 ^{ab}	34 ^{ab}	7,5 ^{bc}	5,2 ^a				
SF (150)	32,3 ^{ab}	1,2 ^{ab}	7,7 ^a	1,7 ^a	49 ^{ab}	3,0 ^b	77 ^{ab}	50 ^{ab}	31 ^a	6,2 ^{ab}	5,5 ^a				
SF (300)	27,2 ^a	0,9 ^a	7,8 ^a	1,5 ^a	41 ^a	2,1 ^a	67 ^a	43 ^{ab}	31 ^a	5,1 ^a	5,0 ^a				
6. niitto, kontrolli	44,3 ^b	2,1 ^{ab}	9,2 ^a	2,5 ^{ab}	75 ^c	4,1 ^b	100 ^a	75 ^a	51 ^c	11,0 ^b	6,4 ^a				
SF (25)	38,9 ^b	1,8 ^a	8,3 ^a	2,5 ^b	64 ^b	4,4 ^b	96 ^a	63 ^a	43 ^{bc}	11,0 ^b	9,6 ^a				
SF (150)	26,5 ^a	2,4 ^b	8,0 ^a	2,1 ^{ab}	57 ^a	3,6 ^b	71 ^a	70 ^a	32 ^{ab}	8,4 ^a	7,6 ^a				
SF (300)	23,7 ^a	2,2 ^{ab}	7,8 ^a	1,8 ^a	51 ^a	2,7 ^a	68 ^a	72 ^a	27 ^a	6,4 ^a	8,3 ^a				
7. niitto, kontrolli	30,8 ^b	1,1 ^a	6,2 ^a	1,7 ^a	44 ^b	2,7 ^a	69 ^b	36 ^a	30 ^b	7,5 ^b	4,2 ^a				
SF (25)	20,0 ^a	1,1 ^a	7,8 ^{ab}	1,6 ^a	32 ^a	3,0 ^a	60 ^{ab}	55 ^{ab}	29 ^b	6,6 ^b	5,0 ^a				
SF (150)	14,5 ^a	2,0 ^b	9,6 ^{bc}	1,5 ^a	33 ^a	3,1 ^a	46 ^{ab}	66 ^{ab}	19 ^a	4,7 ^a	4,1 ^a				
SF (300)	15,2 ^a	2,4 ^c	11,1 ^c	1,6 ^a	32 ^a	2,9 ^a	44 ^a	90 ^b	21 ^a	4,8 ^a	4,5 ^a				

Liite 27. Kauranjyvien fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S) (g kg⁻¹)- ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) sekä kadmium (Cd)-, ja nikkeli (Ni) -pitoisuudet (µg kg⁻¹) haitta-ainekokeessa vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	Cd	Ni	Cr ^s
Kontrolli	3,5 ^a	24,6 ^{ab}	0,6 ^a	1,2 ^a	5,0 ^a	2,0 ^a	68 ^b	61 ^b	52 ^a	5,1 ^a	2,4 ^b	49 ^a	754 ^b	60 ²
A (30)	3,7 ^a	25,0 ^{ab}	0,6 ^a	1,3 ^a	5,4 ^a	2,1 ^a	70 ^b	66 ^b	56 ^{ab}	5,2 ^a	2,4 ^b	54 ^a	757 ^b	79
A (300)	3,9 ^{ab}	25,3 ^{ab}	0,7 ^a	1,4 ^a	5,4 ^a	2,1 ^a	58 ^{ab}	63 ^b	70 ^c	5,2 ^a	2,4 ^b	53 ^a	843 ^b	67 ²
C (30)	3,7 ^a	23,5 ^a	0,6 ^a	1,3 ^a	5,3 ^a	2,0 ^a	40 ^a	62 ^b	52 ^{ab}	5,3 ^a	2,3 ^b	58 ^a	705 ^{ab}	72
C (300)	4,4 ^b	24,2 ^{ab}	0,6 ^a	1,4 ^a	5,3 ^a	2,2 ^a	52 ^{ab}	84 ^c	59 ^b	5,6 ^a	1,3 ^a	54 ^a	831 ^b	74
G (30)	3,5 ^a	24,8 ^{ab}	0,7 ^a	1,2 ^a	5,1 ^a	2,1 ^a	49 ^{ab}	47 ^a	53 ^{ab}	5,6 ^a	2,5 ^b	55 ^a	656 ^{ab}	53 ³
G (120)	3,8 ^{ab}	25,8 ^b	0,7 ^a	1,3 ^a	5,1 ^a	2,2 ^a	50 ^{ab}	40 ^a	57 ^{ab}	5,7 ^a	2,8 ^b	47 ^a	475 ^a	63 ²

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäde, HSY. ^sosa analyysituloksista alle määrittysrajan (53 µg kg⁻¹). Jos pitoisuus alle määrittysrajan, sitä käytettiin laskettaessa kolmen rinnakkaisen keskiarvo. Yläindeksinä oleva luku kertoo alle määrittysrajan olevien rinnakkaisten määrän. Kromipitoisuuksia ei ole testattu tilastollisesti.

Liite 28. Kauranolkien fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S) (g kg⁻¹)- ja rauta (Fe)-, mangaani (Mn)-, sinkki (Zn)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) sekä kadmium (Cd)-, ja nikkeli (Ni) -pitoisuudet (µg kg⁻¹) haitta-ainekokeessa vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo	Cd	Ni	Cr ^s
Kontrolli	0,3 ^a	4,6 ^a	7,0 ^{ab}	2,3 ^a	36 ^a	2,4 ^a	22 ^a	231 ^b	20 ^a	2,7 ^a	2,1 ^{ab}	125 ^a	219 ^a	112 ¹
A (30)	0,4 ^{ab}	5,7 ^a	7,9 ^{ab}	2,8 ^a	38 ^a	2,9 ^{abc}	25 ^{ab}	262 ^{bc}	25 ^a	3,1 ^a	2,0 ^{ab}	130 ^a	249 ^a	109 ¹
A (300)	0,8 ^b	11,3 ^b	9,8 ^b	3,6 ^b	36 ^a	3,6 ^c	36 ^b	228 ^b	46 ^b	4,3 ^b	2,8 ^{bc}	125 ^a	351 ^a	169
C (30)	0,4 ^{ab}	5,1 ^a	7,5 ^{ab}	2,5 ^a	38 ^a	2,7 ^{ab}	21 ^a	253 ^{bc}	20 ^a	2,7 ^a	2,4 ^b	212 ^b	228 ^a	97 ¹
C (300)	0,8 ^b	6,6 ^a	6,5 ^a	2,1 ^a	35 ^a	4,4 ^d	28 ^{ab}	323 ^c	25 ^a	3,2 ^a	1,4 ^a	109 ^a	297 ^a	68 ²
G (30)	0,3 ^a	4,6 ^a	8,1 ^{ab}	2,6 ^a	34 ^a	2,5 ^{ab}	21 ^a	120 ^a	19 ^a	2,8 ^a	2,5 ^{bc}	133 ^a	254 ^a	87 ¹
G (120)	0,4 ^{ab}	7,9 ^{ab}	8,3 ^{ab}	2,7 ^a	37 ^a	3,1 ^{bc}	29 ^{ab}	46 ^a	21 ^a	3,5 ^{ab}	3,3 ^c	111 ^a	255 ^a	118

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäde, HSY. ^sosa analyysituloksista alle määrittysrajan (53 µg kg⁻¹). Jos pitoisuus alle määrittysrajan, sitä käytettiin laskettaessa kolmen rinnakkaisen keskiarvo. Yläindeksinä oleva luku kertoo alle määrittysrajan olevien rinnakkaisten määrän. Kromipitoisuuksia ei ole testattu tilastollisesti.

Liite 29. Raiheinän fosfori (P)-, typpi (N)-, kalsium (Ca)-, magnesium (Mg)-, kalium (K)-, rikki (S) (g kg⁻¹)- ja rauta (Fe)-, kupari (Cu)- ja molybdeeni (Mo) -pitoisuudet (mg kg⁻¹) haitta-ainekokeessa vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P	N	Ca	Mg	K	S	Fe	Mn	Zn	Cu	Mo
Kontrolli	1,9 ^a	22,0 ^a	7,7 ^{ab}	1,9 ^a	40 ^a	1,9 ^a	68 ^a	92 ^{bc}	28 ^a	6,0 ^a	2,0 ^{ab}
A (30)	2,1 ^a	23,9 ^a	8,5 ^{bc}	2,1 ^{ab}	41 ^a	2,1 ^a	66 ^a	108 ^{bc}	31 ^{ab}	6,8 ^{ab}	2,0 ^{ab}
A (300)	2,3 ^a	29,5 ^a	9,8 ^c	3,2 ^c	37 ^a	2,3 ^a	75 ^a	118 ^c	43 ^c	8,2 ^{ab}	1,5 ^a
C (30)	2,1 ^a	20,6 ^a	7,6 ^{ab}	1,8 ^a	40 ^a	2,1 ^a	64 ^a	107 ^{bc}	27 ^a	6,0 ^a	2,1 ^{ab}
C (300)	2,6 ^a	27,1 ^a	6,1 ^a	1,9 ^a	37 ^a	3,4 ^b	79 ^a	102 ^{bc}	36 ^{abc}	8,0 ^{ab}	1,5 ^a
G (30)	2,1 ^a	23,9 ^a	8,4 ^{bc}	2,0 ^a	39 ^a	2,0 ^a	71 ^a	86 ^b	29 ^a	6,5 ^{ab}	2,3 ^{ab}
G (120)	2,0 ^a	29,3 ^a	9,1 ^{bc}	2,5 ^b	43 ^a	2,6 ^a	76 ^a	54 ^a	39 ^{bc}	9,3 ^b	2,6 ^b

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäte, HSY

Liite 30. Raiheinän kadmium (Cd)-, lyijy (Pb)-, nikkeli (Ni)-, koboltti (Co)-, kromi (Cr)- ja arseeni (As) -pitoisuudet (µg kg⁻¹) haitta-ainekokeessa vuonna 2016. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	Cd	Pb	Ni	Co	Cr	As
Kontrolli	68 ^b	105 ^a	685 ^{bc}	59 ^{bcd}	316 ^a	48 ^a
A (30)	69 ^b	147 ^a	596 ^{abc}	61 ^{cd}	285 ^a	47 ^a
A (300)	59 ^b	117 ^a	704 ^c	67 ^d	320 ^a	39 ^a
C (30)	59 ^b	122 ^a	481 ^a	53 ^{ab}	219 ^a	43 ^a
C (300)	29 ^a	108 ^a	529 ^{ab}	48 ^a	278 ^a	42 ^a
G (30)	75 ^b	129 ^a	527 ^{ab}	57 ^{bc}	259 ^a	50 ^a
G (120)	77 ^b	136 ^a	502 ^a	59 ^{bcd}	267 ^a	44 ^a

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäte, HSY

Liite 31. Ohrakokeen astiakoemaille vuoden 2015 kasvukauden jälkeen suoritettu viljavuusanalyysi. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10* mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne	2,2	1215	90	57	14	0,7	6,3
Kontrolli	2,0 ^a	2156 ^{c-g}	232 ^{ghi}	111 ^{a-e}	47 ^a	7,4 ^{bc}	6,0 ^{c-f}
A (200)	2,4 ^{a-d}	2224 ^{c-g}	166 ^{a-f}	117 ^{c-f}	76 ^a	6,6 ^{abc}	6,0 ^{d-h}
A (400)	2,9 ^{a-e}	2263 ^{d-g}	156 ^{a-e}	117 ^{c-f}	78 ^a	6,1 ^{abc}	6,0 ^{d-g}
B (200)	2,5 ^{a-d}	2156 ^{c-g}	177 ^{b-h}	105 ^{a-e}	80 ^a	3,8 ^{ab}	6,2 ^{hij}
B (400)	2,9 ^{b-e}	2207 ^{c-g}	170 ^{a-f}	105 ^{a-e}	84 ^a	2,7 ^{ab}	6,3 ⁱ
C (200)	2,5 ^{a-d}	1973 ^{bc}	148 ^{abc}	94 ^{abc}	101 ^a	4,2 ^{ab}	6,1 ^{e-j}
C (400)	3,1 ^{c-f}	1891 ^b	141 ^{abc}	91 ^{ab}	168 ^{ab}	6,0 ^{abc}	5,8 ^{abc}
D (200)	2,2 ^{ab}	2068 ^{b-e}	158 ^{a-e}	104 ^{a-e}	70 ^a	5,3 ^{abc}	6,1 ^{f-j}
D (400)	2,5 ^{a-d}	2021 ^{bcd}	154 ^{a-d}	108 ^{a-e}	106 ^a	5,3 ^{abc}	6,0 ^{d-g}
E (200)	2,6 ^{a-d}	2074 ^{b-e}	197 ^{c-h}	99 ^{a-d}	58 ^a	4,3 ^{ab}	6,2 ^{g-j}
E (400)	4,0 ^{fgh}	2286 ^{efg}	220 ^{f-i}	118 ^{def}	86 ^a	5,4 ^{abc}	6,2 ^{hij}
F (200)	4,0 ^{gh}	1856 ^b	112 ^a	120 ^{def}	97 ^a	2,6 ^a	6,2 ^{g-j}
F (400)	7,6 ^j	2042 ^{b-e}	137 ^{ab}	178 ^g	261 ^b	5,9 ^{abc}	6,0 ^{d-g}
G (200)	2,3 ^{abc}	2156 ^{c-g}	209 ^{d-h}	109 ^{a-e}	63 ^a	5,8 ^{abc}	6,1 ^{f-j}
G (400)	2,8 ^{a-e}	2264 ^{d-g}	165 ^{a-f}	115 ^{b-e}	71 ^a	5,2 ^{abc}	6,2 ^{f-j}
H (200)	2,5 ^{a-d}	1476 ^a	214 ^{e-i}	102 ^{a-d}	52 ^a	6,0 ^{abc}	5,7 ^a
H (400)	2,9 ^{a-e}	1584 ^a	177 ^{b-g}	114 ^{b-e}	54 ^a	5,9 ^{abc}	5,7 ^{ab}
I (200)	3,5 ^{efg}	1498 ^a	236 ^{hi}	128 ^{ef}	609 ^c	17,8 ^d	5,9 ^{a-d}
I (400)	4,5 ^{hi}	1545 ^a	272 ⁱ	143 ^f	1136 ^d	27,4 ^e	5,9 ^{b-e}
J	3,2 ^{d-g}	2188 ^{c-g}	152 ^{a-d}	104 ^{a-e}	108 ^a	4,8 ^{abc}	6,0 ^{d-g}
K	3,5 ^{efg}	2388 ^{gh}	158 ^{a-e}	115 ^{b-e}	111 ^a	6,3 ^{abc}	6,1 ^{f-j}
SF (10)	2,2 ^{ab}	2204 ^{c-g}	222 ^{f-i}	123 ^{def}	69 ^a	9,4 ^c	6,0 ^{d-g}
SF (25)	2,5 ^{a-d}	2256 ^{d-g}	158 ^{a-e}	111 ^{a-e}	76 ^a	6,0 ^{abc}	6,2 ^{g-j}
SF (50)	3,0 ^{b-e}	2082 ^{b-f}	148 ^{abc}	90 ^a	98 ^a	3,5 ^{ab}	6,3 ^{ij}
SF (150)	5,1 ⁱ	2338 ^{fgh}	135 ^{ab}	103 ^{a-e}	287 ^b	6,2 ^{abc}	6,1 ^{d-i}
SF (300)	8,7 ^k	2589 ^h	121 ^{ab}	105 ^{a-e}	507 ^c	7,4 ^{bc}	6,0 ^{c-f}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 32. Ohrakokeen astiakoemaille vuoden 2016 kasvukauden jälkeen suoritettu viljavuusanalyysi. Eri kirjaimilla merkityt käsittelyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10 [*] mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne (2015)	2,2	1215	90	57	14	0,7	6,3
Kontrolli	1,2 ^a	3559 ^{def}	432 ^{ghi}	160 ^{c-i}	95 ^a	21,5 ^{e-h}	6,4 ^{a-f}
A (200)	1,5 ^{abc}	3342 ^{b-f}	351 ^{c-g}	155 ^{c-h}	105 ^{ab}	20,0 ^{e-h}	6,2 ^{a-e}
A (400)	1,8 ^{b-f}	3452 ^{b-f}	294 ^{bcd}	162 ^{c-i}	129 ^{ab}	19,4 ^{e-h}	6,3 ^{a-e}
B (200)	1,7 ^{b-e}	3220 ^{b-f}	364 ^{c-h}	176 ^{ghi}	148 ^{ab}	20,6 ^{e-h}	6,1 ^a
B (400)	1,9 ^{a-g}	3049 ^{a-f}	297 ^{bcd}	153 ^{c-h}	150 ^{ab}	14,3 ^{cde}	6,3 ^{a-e}
C (200)	1,5 ^{a-d}	3195 ^{b-f}	302 ^{bcd}	151 ^{b-g}	173 ^{ab}	18,8 ^{d-h}	6,2 ^{abc}
C (400)	1,8 ^{b-f}	3289 ^{b-f}	217 ^b	133 ^{bc}	201 ^b	16,0 ^{c-g}	6,3 ^{a-f}
D (200)	1,5 ^{a-d}	3342 ^{b-f}	383 ^{c-i}	171 ^{f-i}	135 ^{ab}	22,4 ^{gh}	6,2 ^{abc}
D (400)	1,6 ^{b-e}	3435 ^{b-f}	350 ^{c-g}	173 ^{f-i}	169 ^{ab}	22,3 ^{gh}	6,2 ^{ab}
E (200)	1,7 ^{b-e}	3178 ^{b-f}	401 ^{d-i}	163 ^{d-i}	111 ^{ab}	19,2 ^{e-h}	6,3 ^{a-e}
E (400)	2,0 ^{e-h}	3192 ^{b-f}	425 ^{f-i}	171 ^{f-i}	133 ^{ab}	18,2 ^{c-h}	6,3 ^{a-f}
F (200)	2,4 ^h	2606 ^a	236 ^b	141 ^{b-e}	105 ^{ab}	7,1 ^{ab}	6,4 ^{b-f}
F (400)	4,7 ⁱ	3004 ^{a-d}	281 ^{bc}	186 ⁱ	198 ^b	11,4 ^{abc}	6,5 ^{ef}
G (200)	1,6 ^{bcd}	3466 ^{c-f}	447 ^{ghi}	174 ^{f-i}	116 ^{ab}	24,0 ^h	6,3 ^{a-e}
G (400)	1,9 ^{c-f}	3248 ^{b-f}	361 ^{c-h}	158 ^{c-i}	115 ^{ab}	18,5 ^{c-h}	6,3 ^{a-e}
H (200)	1,8 ^{c-f}	3588 ^f	416 ^{e-i}	164 ^{d-i}	104 ^{ab}	21,6 ^{fgh}	6,5 ^{c-f}
H (400)	2,1 ^{fgh}	3384 ^{b-f}	363 ^{c-h}	162 ^{c-i}	105 ^{ab}	19,4 ^{efgh}	6,4 ^{b-f}
I (200)	2,3 ^{gh}	3109 ^{a-f}	463 ^{hi}	178 ^{ghi}	658 ^c	24,9 ^h	6,4 ^{b-f}
I (400)	3,1 ⁱ	2895 ^{ab}	483 ⁱ	182 ^{hi}	1219 ^d	32,9 ⁱ	6,5 ^{def}
J	1,7 ^{b-e}	3579 ^{ef}	309 ^{b-e}	166 ^{d-i}	159 ^{ab}	21,0 ^{e-h}	6,3 ^{a-e}
K	1,8 ^{b-f}	3219 ^{b-f}	313 ^{b-f}	146 ^{b-f}	113 ^{ab}	16,3 ^{c-g}	6,3 ^{a-e}
SF (10)	1,4 ^{ab}	3597 ^f	430 ^{ghi}	169 ^{e-i}	107 ^{ab}	22,7 ^{gh}	6,3 ^{a-f}
SF (25)	1,5 ^{abc}	3205 ^{b-f}	366 ^{c-h}	156 ^{c-h}	109 ^{ab}	18,8 ^{d-h}	6,2 ^{a-d}
SF (50)	1,7 ^{b-f}	2976 ^{abc}	283 ^{bc}	138 ^{bcd}	109 ^{ab}	14,5 ^{c-f}	6,2 ^{a-e}
SF (150)	2,9 ⁱ	3331 ^{b-f}	233 ^b	121 ^b	181 ^{ab}	11,7 ^{bcd}	6,5 ^{def}
SF (300)	5,9 ^k	3022 ^{a-e}	104 ^a	57 ^a	141 ^{ab}	4,2 ^a	6,6 ^f

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy , I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 33. Raiheinän astiakoemaille vuoden 2015 kasvukauden jälkeen suoritettu viljavuusanalyysi. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10 [*] mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne (2015)	2,2	1215	90	57	14	0,7	6,3
Kontrolli	1,9 ^{ab}	2299 ^c	405 ^{gh}	88 ^{ab}	36 ^a	17,4 ^{bcd}	5,7 ^{bc}
A (200)	2,2 ^{abcd}	2366 ^{cd}	290 ^{abcdefg}	87 ^{ab}	69 ^a	15,8 ^{abcd}	5,7 ^{bc}
A (400)	2,7 ^{def}	2444 ^{cde}	192 ^{abc}	94 ^{ab}	104 ^{ab}	14,1 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
B (200)	2,4 ^{abcde}	2316 ^c	291 ^{abcdegh}	76 ^{ab}	62 ^a	11,8 ^{abc}	5,9 ^{bc}
B (400)	2,9 ^{efg}	2682 ^{ef}	238 ^{abcde}	102 ^{ab}	198 ^{bcd}	13,8 ^{abcd}	5,9 ^{bc}
C (200)	2,4 ^{abcde}	2371 ^{cde}	205 ^{abcd}	84 ^{ab}	135 ^{abc}	13,4 ^{abcd}	5,9 ^{bc}
C (400)	3,0 ^{efg}	2438 ^{cde}	181 ^{abc}	81 ^{ab}	316 ^e	13,4 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
D (200)	2,3 ^{abcde}	2289 ^c	208 ^{abcd}	82 ^{ab}	71 ^a	12,5 ^{abc}	5,8 ^{bc}
D (400)	2,9 ^{efg}	2467 ^{cde}	193 ^{abc}	90 ^{ab}	112 ^{ab}	12,6 ^{abc}	5,9 ^{bc}
E (200)	2,5 ^{abcde}	2536 ^{cde}	240 ^{abcde}	92 ^{ab}	69 ^a	14,6 ^{abcd}	5,9 ^{cd}
E (400)	3,4 ^{fgh}	2646 ^{def}	162 ^{ab}	93 ^{ab}	87 ^a	10,7 ^{ab}	6,1 ^e
F (200)	3,5 ^{gh}	2299 ^c	160 ^{ab}	108 ^b	119 ^{ab}	9,0 ^a	6,1 ^{de}
F (400)	5,5 ⁱ	2369 ^{cde}	151 ^{ab}	156 ^c	253 ^{de}	10,8 ^{ab}	5,9 ^{bc}
G (200)	2,2 ^{abcd}	2241 ^{bc}	445 ^h	76 ^{ab}	38 ^a	14,5 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
G (400)	2,6 ^{abcde}	2513 ^{cd}	190 ^{abc}	82 ^{ab}	68 ^a	13,3 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
H (200)	2,2 ^{abcd}	1758 ^a	365 ^{efgh}	81 ^{ab}	45 ^a	16,3 ^{bcd}	5,4 ^a
H (400)	2,5 ^{abcde}	1744 ^a	353 ^{defgh}	80 ^{ab}	54 ^a	14,2 ^{abcd}	5,4 ^a
I (200)	2,6 ^{bcddef}	1858 ^a	236 ^{abcde}	102 ^{ab}	660 ^g	20,3 ^d	5,7 ^b
I (400)	3,9 ^h	1934 ^{ab}	255 ^{abcdef}	150 ^c	1238 ^h	33,5 ^e	5,7 ^b
J	2,4 ^{abcde}	2437 ^{cde}	289 ^{abcdefg}	95 ^{ab}	112 ^{ab}	16,9 ^{bcd}	5,7 ^{bc}
K	2,5 ^{abcde}	2422 ^{cde}	328 ^{cdefgh}	85 ^{ab}	77 ^a	15,9 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
SF (10)	1,8 ^a	2279 ^c	423 ^{gh}	91 ^{ab}	54 ^a	17,9 ^{cd}	5,7 ^{bc}
SF (25)	2,0 ^{abc}	2349 ^{cd}	298 ^{bcddefgh}	86 ^{ab}	70 ^a	15,1 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
SF (50)	2,3 ^{abcde}	2332 ^c	251 ^{abcdef}	77 ^{ab}	97 ^{ab}	13,9 ^{abcd}	5,8 ^{bc}
SF (150)	4,1 ^h	2545 ^{cde}	143 ^{ab}	72 ^a	240 ^{cde}	11,6 ^{abc}	5,8 ^{bc}
SF (300)	7,9 ⁱ	2878 ^f	143 ^a	89 ^{ab}	519 ^f	13,5 ^{abcd}	5,9 ^{bc}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 34. Raiheinän astiakoemaille vuoden 2016 kasvukauden jälkeen suoritettu viljavuusanalyysi. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10 [*] mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne (2015)	2,2	1215	90	57	14	0,7	6,3
Kontrolli	1,2 ^a	4065 ^f	887 ^{gh}	136 ^g	80 ^{ab}	36,3 ^{hi}	6,2 ^a
A (200)	1,5 ^{abcde}	3932 ^{def}	519 ^{bcd}	113 ^{fg}	81 ^{ab}	25,7 ^{defghi}	6,4 ^{abcd}
A (400)	1,7 ^{defgh}	3958 ^{ef}	272 ^{abcd}	107 ^{defg}	105 ^{abc}	20,5 ^{bcdefg}	6,5 ^{bcdef}
B (200)	1,6 ^{bcde}	3532 ^{abcdef}	295 ^{abcde}	89 ^{cdef}	71 ^{ab}	13,5 ^{abcd}	6,7 ^{defg}
B (400)	2,0 ^{hi}	3985 ^f	128 ^a	103 ^{defg}	169 ^{abc}	14,5 ^{abcde}	6,8 ^g
C (200)	1,7 ^{cdefg}	3808 ^{cdef}	320 ^{abcde}	95 ^{cdefg}	123 ^{abc}	23,5 ^{defghi}	6,4 ^{abcd}
C (400)	1,8 ^{efgh}	2843 ^a	105 ^a	34 ^a	96 ^{ab}	7,1 ^a	6,4 ^{abc}
D (200)	1,4 ^{abcd}	3854 ^{cdef}	314 ^{abcde}	108 ^{efg}	87 ^{ab}	25,0 ^{defghi}	6,4 ^{abcd}
D (400)	1,6 ^{bcde}	3611 ^{bcd}	141 ^a	93 ^{cdef}	122 ^{abc}	14,3 ^{abcd}	6,6 ^{cdefg}
E (200)	1,7 ^{bcd}	3468 ^{abcde}	272 ^{abcd}	84 ^{bcd}	55 ^{ab}	16,6 ^{bcdef}	6,5 ^{bcdef}
E (400)	2,0 ^{hi}	3103 ^{abc}	133 ^a	62 ^{abc}	46 ^a	7,3 ^a	6,6 ^{bcdef}
F (200)	2,2 ^{ij}	2869 ^{ab}	137 ^a	66 ^{abcd}	57 ^{ab}	7,1 ^a	6,5 ^{abcde}
F (400)	4,1 ⁱ	3186 ^{abcd}	98 ^a	85 ^{bcd}	138 ^{abc}	7,5 ^{ab}	6,6 ^{cdefg}
G (200)	1,4 ^{ab}	4027 ^f	532 ^{cdef}	125 ^{fg}	80 ^{ab}	27,9 ^{defghi}	6,4 ^{abc}
G (400)	1,6 ^{bcde}	4012 ^f	229 ^{abc}	104 ^{defg}	79 ^{ab}	19,2 ^{bcdef}	6,8 ^{efg}
H (200)	1,6 ^{bcde}	4157 ^f	786 ^{fgh}	123 ^{fg}	73 ^{ab}	34,4 ^{ghi}	6,4 ^{abcde}
H (400)	2,0 ^{ghi}	3869 ^{def}	616 ^{efg}	105 ^{defg}	62 ^{ab}	29,0 ^{efghi}	6,5 ^{abcde}
I (200)	2,0 ^{ghi}	3206 ^{abcde}	298 ^{abcde}	86 ^{bcd}	376 ^d	18,3 ^{bcdef}	6,5 ^{abcde}
I (400)	2,9 ^k	3421 ^{abcde}	199 ^{ab}	106 ^{defg}	104 ^{2e}	25,4 ^{defghi}	6,6 ^{bcdefg}
J	1,7 ^{cdefg}	3874 ^{def}	562 ^{defg}	107 ^{defg}	104 ^{ab}	30,2 ^{fghi}	6,3 ^{ab}
K	1,7 ^{cdef}	3875 ^{def}	343 ^{abcde}	110 ^{efg}	98 ^{ab}	22,4 ^{bcdefghi}	6,5 ^{bcdef}
SF (10)	1,4 ^{abc}	4076 ^f	959 ^h	137 ^g	85 ^{ab}	36,9 ⁱ	6,3 ^{ab}
SF (25)	1,4 ^{ab}	4033 ^f	611 ^{efg}	121 ^{fg}	85 ^{ab}	29,7 ^{fghi}	6,5 ^{abcde}
SF (50)	1,5 ^{abcd}	3704 ^{def}	409 ^{abcde}	102 ^{cdefg}	91 ^{ab}	22,1 ^{bcdefgh}	6,5 ^{abcde}
SF (150)	2,4 ^j	3856 ^{cdef}	93 ^a	70 ^{abcde}	199 ^{bc}	13,7 ^{abcd}	6,8 ^{fg}
SF (300)	4,9 ^m	3614 ^{bcde}	80 ^a	47 ^{ab}	248 ^{cd}	8,1 ^{abc}	6,7 ^{deg}

#A: HSY:n maanparannuskomposti, B: Stormossenin komposti, Vaasa, C: Kemicond, Oulu D: Mädate, Gasum Biovacka Turku, E: Peltokymppi A, Biokymppi, F: Gasum Biovacka Vehmaa, G: Pyrolysoitu mädate, HSY, H: Jätevesilietteen tuhka 1, Endev Oy, I: Jätevesilietteen tuhka 2 (peräisin Puolasta), J: Maanparannuskomposti, HSY (200) + SF (25), K: Pyrolysoitu mädate, HSY + SF (25). SF = superfosfaatti.

Liite 35. Vuonna 2016 perustetuille ohra- ja raiheinäkokeiden astiakoemaille suoritettut viljavuusanalyysit kasvukauden 2016 jälkeen. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10 [*] mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne	2,2	1215	90	57	14	0,7	6,3
Ohra: kontrolli	1,4 ^a	2034 ^{ab}	153 ^c	100 ^b	40 ^a	6,6 ^b	6,0 ^a
L (200)	3,1 ^c	1914 ^a	88 ^b	97 ^b	17 ^a	1,2 ^a	6,3 ^c
SF (10)	1,4 ^a	2077 ^{ab}	140 ^c	92 ^b	42 ^a	7,1 ^b	6,0 ^a
SF (50)	1,9 ^b	1883 ^a	83 ^b	62 ^a	47 ^a	2,1 ^a	6,2 ^b
SF (150)	2,9 ^c	2209 ^b	59 ^a	69 ^a	152 ^b	2,4 ^a	6,2 ^{bc}
Raiheinä: kontrolli	1,4 ^a	1986 ^{ab}	315 ^c	66 ^a	32 ^a	8,6 ^b	5,8 ^a
SF (25)	1,5 ^a	1853 ^a	168 ^b	42 ^a	26 ^a	4,7 ^a	5,9 ^{ab}
SF (150)	2,6 ^b	2247 ^{bc}	101 ^{ab}	46 ^a	142 ^b	4,1 ^a	6,1 ^b
SF (300)	5,2 ^c	2570 ^c	79 ^a	48 ^a	324 ^c	5,3 ^a	6,0 ^b

#L: Jätevesilietteen tuhka 3 (peräisin Puolasta), SF = superfosfaatti.

Liite 36. Haitta-ainekokeen astiakoemaalle suoritettu viljavuusanalyysi kasvatuskokeen (kaura) päätyttyä. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, $p < 0,05$).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10 [*] mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne	2,0	1483	102	71	20	0,9	5,9
Kontrolli	3,2 ^a	1778 ^a	60 ^b	63 ^a	142 ^a	2,3 ^a	5,8 ^b
A (30)	3,6 ^{ab}	1865 ^a	52 ^{ab}	62 ^a	193 ^a	2,6 ^a	5,8 ^b
A (300)	5,1 ^{bc}	2274 ^b	41 ^a	81 ^{ab}	319 ^a	3,6 ^a	5,8 ^b
C (30)	3,3 ^a	1778 ^a	57 ^b	68 ^a	203 ^a	2,9 ^a	5,7 ^b
C (300)	4,2 ^{abc}	1814 ^a	55 ^b	78 ^{ab}	564 ^b	3,9 ^a	5,4 ^a
G (30)	4,4 ^{abc}	2081 ^{ab}	57 ^b	67 ^a	187 ^a	2,3 ^a	5,9 ^c
G (120)	5,6 ^c	2714 ^c	51 ^{ab}	104 ^b	266 ^a	3,4 ^a	6,2 ^d

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäte, HSY

Liite 37. Haitta-ainekokeen astiakoemaalle suoritettu viljajuusanalyysi kasvatuskokeen (raiheinä) päätyttyä. Eri kirjaimilla merkityt käsitellyt poikkeavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Tukeyn testi, p<0,05).

	P, mg l ⁻¹	Ca, mg l ⁻¹	K, mg l ⁻¹	Mg, mg l ⁻¹	S, mg l ⁻¹	Johtoluku, 10* mS cm ⁻¹	pH
Lähtötilanne	2,0	1483	102	71	20	0,9	5,9
Kontrolli	3,7 ^{ab}	1711 ^a	59 ^a	92 ^a	221 ^a	3,0 ^a	5,6 ^b
A (30)	4,1 ^{ab}	1798 ^{ab}	54 ^a	99 ^a	261 ^a	3,5 ^{ab}	5,6 ^b
A (300)	5,8 ^{cd}	2228 ^c	46 ^a	118 ^{ab}	412 ^b	4,9 ^{ab}	5,6 ^b
C (30)	3,5 ^a	1693 ^a	55 ^a	96 ^a	242 ^a	2,9 ^a	5,6 ^b
C (300)	4,2 ^{ab}	1708 ^a	58 ^a	107 ^a	550 ^c	5,0 ^{ab}	5,3 ^a
G (30)	4,7 ^{bc}	1995 ^b	59 ^a	108 ^a	300 ^{ab}	4,0 ^{ab}	5,7 ^b
G (120)	6,6 ^d	2708 ^d	69 ^a	148 ^b	405 ^b	6,6 ^b	6,0 ^c

#A: HSY:n maanparannuskomposti, C: Kemicond, Oulu G: Pyrolysoitu mädäte, HSY

Liite 38. Lääkeaineiden ja biosidien pitoisuudet kaurajauhossa. Tulokset ovat tuorepainoa kohden (µg kg⁻¹).

Näyte	Kuivapaino	E2	ATE	MET	SOT	PCM	DCF	IBU	CBZ	SDZ	TET	NOF	CIF	OF	TCS	TCC
kontrolli	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
kontrolli	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
kontrolli	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 30	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 30	94,1 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 30	93,7 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 300	93,7 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	20	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 300	93,6 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
MP 300	93,7 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 30	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 30	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 30	93,6 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 150	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 150	93,7 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
PYR 150	93,7 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 30	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 30	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 30	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 300	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 300	93,9 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	0.16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21
KC 300	93,8 %	NA	<21	<1,1	<21	<11	<21	<2,1	<0,16	<0,21	<11	<0,11	<0,11	<0,21	<210	<0,21

Liite 39. Lääkeaineiden ja biosidien pitoisuudet raiheinässä tuorepainoa kohden ($\mu\text{g kg}^{-1}$).

Näyte	Kuivapaino	E2	ATE	MET	SOT	PCM	DCF	IBU	CBZ	SDZ	TET	NOF	CIF	OF	TCS	TCC
Kontrolli	13,4 %	<90	<11	<1,5	<37	<45	<23	<4,5	<0,45	<1,9	<3,0	<13	<0,9	<0,9	<130	<3,0
Kontrolli	11,8 %	<100	<13	<1,7	<42	<51	<26	<5,1	<0,51	<2,1	<3,4	<15	<1,0	<1,0	<150	<3,4
Kontrolli	10,0 %	<120	<15	<2,0	<50	<60	<31	<6,0	<0,60	<2,5	<4,0	<18	<1,2	<1,2	<180	<4,0
MP 30	11,1 %	<110	<14	<1,8	<45	<54	<28	<5,4	<0,54	<2,3	<3,6	18	<1,1	<1,1	<160	<3,6
MP 30	9,8 %	<120	<15	<2,0	<51	<61	<32	<6,1	<0,61	<2,5	<4,1	<18	<1,2	<1,2	<180	<4,1
MP 30	11,9 %	<100	<13	<1,7	<42	<50	<26	<5,0	<0,50	<2,1	<3,3	<15	<1,0	<1,0	<150	<3,3
MP 300	12,2 %	<99	<12	<1,6	<41	<49	<26	<4,9	4,8	<2,1	<3,3	<15	<1,0	<1,0	<150	<3,3
MP 300	10,8 %	<110	<14	<1,8	<46	<55	<29	<5,5	0,93	<2,3	<3,7	<17	<1,1	<1,1	<170	<3,7
MP 300	10,0 %	<120	<15	<2,0	<50	<60	31	<6,0	0,97	<2,5	<4,0	<18	<1,2	<1,2	<180	<4,0
PYR 30	11,6 %	<100	<13	<1,7	<43	<52	<27	<5,2	<0,52	<2,2	<3,5	<16	<1,0	<1,0	<160	<3,5
PYR 30	12,1 %	<99	<12	<1,6	<41	<49	<26	<4,9	<0,49	<2,1	<3,3	<15	<1,0	<1,0	<150	<3,3
PYR 30	11,1 %	<110	<14	<1,8	<45	<54	<28	<5,4	<0,54	<2,3	<3,6	<16	<1,1	<1,1	<160	<3,6
PYR 120	10,6 %	<110	<14	<1,9	<47	<57	<29	<5,7	<0,57	<2,4	<3,8	<17	<1,1	<1,1	<170	<3,8
PYR 120	10,9 %	<110	<14	<1,8	<46	<55	<29	<5,5	<0,55	<2,3	<3,7	<17	<1,1	<1,1	<170	<3,7
PYR 120	15,1 %	<79	<10	<1,3	<33	<40	<21	<4,0	<0,40	<1,7	<2,6	<12	<0,8	<0,8	<120	<2,6
KC 30	12,5 %	<96	<12	<1,6	<40	<48	<25	<4,8	<0,48	<2,0	<3,2	<14	<1,0	<1,0	<140	<3,2
KC 30	10,3 %	<120	<15	<2,0	<49	<59	<30	<5,9	<0,59	<2,4	<3,9	<18	<1,2	<1,2	<180	<3,9
KC 30	11,8 %	<100	<13	<1,7	<42	<51	<26	<5,1	<0,51	<2,1	<3,4	<15	<1,0	<1,0	<150	<3,4
KC 300	10,3 %	<120	<15	<1,9	<49	<58	<30	<5,8	<0,58	<2,4	<3,9	<17	<1,2	<1,2	<180	<3,9
KC 300	10,2 %	<120	<15	<2,0	<49	<59	<30	<5,9	<0,59	<2,4	<3,9	<18	<1,2	<1,2	<180	<3,9
KC 300	10,8 %	<110	<14	<1,9	<46	<56	<29	<5,6	1,8	<2,3	<3,7	18	<1,1	<1,1	<170	<3,7

Liite 40. Laskennassa käytettyjä yhdistekohia lähtöarvoja: puoliintumisaika maaperässä (DT50), puoliintumisaian määrittymisen referenssilämpötila (Tref), jakautumiskerroin (K_d tai K_{oc}), havaitut pitoisuudet lietuotteissa kuiva-ainetta kohti (mg kg^{-1} ka.), haitattomaksi oletettu pitoisuus (PNEC).

Yhdiste	DT50 (vrk)	Tref (°C)	K_{oc} / K_d (kg^{-1})	Pit. (mg kg^{-1} ka.)		PNEC _{vesi} (mg l^{-1})	PNEC _{maa} ^{a)} (mg kg^{-1} ka)	k_{degr}^b (1 vrk^{-1})
				PProduct-max	Ruotsi, 95 % ¹⁾ (n-hav./n-tot)			
ANTR	2883,5 ²⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 10 000 ³⁾	0,084	0,088 (9/9)	-	0,13 ³⁾	4,85E-05
ANP	102 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 1 700 ³⁾	0,088	0,054 (8/9)	-	0,038 ³⁾	1,37E-03
ANY	60 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 1 500 ³⁾	0,012	0,41 (3/4)	-	0,17 ⁵⁾	2,33E-03
BAA	680 ²⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 308 600 ³⁾	0,13	0,39 (9/9)	-	0,079 ³⁾	2,06E-04
BAP	2993 ⁶⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 661 000 ⁷⁾	0,11	0,34 (20/38)	-	0,053 ³⁾	4,68E-05
BBF	3285 ⁶⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 109 400 ³⁾	0,25	0,45 (19/29)	-	0,28 ³⁾ d)	4,26E-05
BGHI	3321,5 ⁶⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 940 200 ³⁾	0,33	0,8 (21/38)	-	0,17 ³⁾ d)	4,41E-05
BKF	3175,5 ⁶⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 794 300 ⁵⁾ L	0,077	0,25 (19/29)	-	0,27 ³⁾ d)	4,41E-05
DBAH	940 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 1 380 000 ⁷⁾	0,026	0,13 (9/9)	-	0,18 ⁵⁾	1,49E-04
PHN	200 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 8 500 ³⁾	0,51	0,72 (5/5)	-	1,8 ³⁾	7,00E-04
FLUO	440 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 75 700 ³⁾	0,67	0,93 (28/34)	-	1,5 ³⁾	3,18E-04
FLUR	60 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 2 950 ³⁾	0,13	0,13 (9/9)	-	1 ³⁾	2,33E-03
IP	730 ⁴⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 524 100 ³⁾	0,29	0,46 (20/38)	-	0,38 ⁵⁾	1,92E-04
CHRY	1000 ²⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 262 650 ³⁾	0,12	0,59 (9/9)	-	0,55 ³⁾ d)	1,40E-04
NAFT	766,5 ⁶⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 955 ⁷⁾	0,082	0,099 (8/9)	-	0,69 ⁵⁾	1,83E-04
BDE-99	707 ⁷⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 500 000 ⁷⁾	0,022	0,05 (105/105)	-	0,38 ⁷⁾	1,98E-04
BDE-209	3200 ⁷⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 2 000 000 ⁷⁾	3,5	0,82 (103/105)	-	98 ⁷⁾	4,37E-05
E2	2,3 ⁸⁾	22	K_{oc} : 1380 ⁹⁾	0,074	0,23 (7/68)	0,00000035 ¹⁰⁾	0,0000081	6,08E-02
ATE	75 ¹¹⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 148 ¹¹⁾	0,0078	0,034 (5/17)	0,020 ¹²⁾	0,049	1,87E-03
MET	75 ¹¹⁾	22 ^{c)}	K_{oc} : 62 ¹¹⁾	0,023	0,49 (10/17)	0,0001 ¹²⁾	0,0001	1,87E-03
DCF	20,44 ¹³⁾	20	K_{oc} : 200 ¹³⁾	0,081	0,07 (55/77)	0,00002 ¹²⁾	0,000067	8,21E-03
IBU	121,9 ⁸⁾	22	K_{oc} : 87,1 ¹³⁾	0,26	0,28 (60/77)	0,0002 ¹²⁾	0,00029	1,15E-03
CBZ	465 ¹⁴⁾	14	K_{oc} : 105 ¹³⁾	0,026	0,2 (29/32)	-	0,00005 ¹⁵⁾ d)	6,33E-04
TCS	187 ¹⁴⁾	14	K_{oc} : 2188 ¹³⁾	0,73	8,4 (179/181)	0,0000014 ¹⁶⁾	0,000051	1,57E-03
TCC	1000 ¹⁴⁾	14	-	0,18	0,64 (6/8)	-	0,037 ¹⁷⁾	2,94E-04
SDZ	34 ¹⁸⁾	25	K_d : 0,98 ¹⁸⁾	0,001	NA	0,00014 ¹⁹⁾	0,00011	3,15E-03
TET	578 ¹⁴⁾	14	K_{oc} : 1380 ²⁰⁾	0,63	3,6 (41/78)	0,0001 ²¹⁾	0,0021	5,09E-04
NOF	1155 ¹⁴⁾	14	K_{oc} : 741 ²⁰⁾	0,51	5,1 (54/111)	0,0005 ²²⁾	0,0062	2,55E-04

CIF	2310 ¹⁴⁾	14	K _d : 427 ²³⁾	1,2	8,8 (111/111)	0,000064 ²²⁾	0,0018	1,27E-04
OF	1386 ¹⁴⁾	14	K _d : 309 ²³⁾	0,54	1,3 (42/111)	0,000022 ¹²⁾	0,0057	2,12E-04
Yhdiste		KOC (l/kg)		Pit. [mg/kg k.a.]		PNEC _{vesi} [mg/l]	PNEC _{maa} ^{a)} (mg/kg k.a.)	k _{leach} (1/vrk)
				PProduct-max	Ruotsi, 95 % ¹⁾ (n-hav./n-tot)			
PFOA		96 ²⁴⁾		0,0092	0,018 (95/111)	0,1 ²⁵⁾	0,16	1,25E-03
PFNA		251 ²⁶⁾		0,0013	0,012 (77/109)	0,1 ²⁵⁾	0,42	4,77E-04
PFDA		3980 ²⁶⁾		0,0049	0,047 (88/107)	0,011 ²⁵⁾	0,73	3,01E-05
PFOS		710 ²⁴⁾		0,0051	0,048 (109/111)	0,00061 ²⁷⁾	0,1 ²⁸⁾	1,69E-04

a) Ellei lähdettä ole ilmoitettu, PNEC-arvo on laskettu vesieliölle sovellettavasta PNEC-arvosta taulukon 9 yhtälön 11 mukaisesti.

b) Johdettu käyttäen **Virhe. Viiteen lähdettä ei löytnyt.** yhtälöä 3

c) Referenssilämpötilaa ei ilmoitettu, koe oletettiin tehdyksi huoneenlämmössä.

d) Kirjallisuudessa ilmoitettu PNEC-arvo johdettu EqP-menetelmällä

e) Johdettu käyttäen **Virhe. Viiteen lähdettä ei löytnyt.** yhtälöä 5

- 1) IVL & Naturvårdsverket 2017

2) Howard ym. 1991

3) Eriksen ym. 2009

4) Paraiba ym. 2011

5) Verbruggen ym. 2012

6) MacKay ym. 2006

7) Sternbeck ym. 2011

8) Carr ym. 2011

9) Mashtare ym. 2011

10) EU 2012
- 11) Von Hellens 2015

12) Orias & Perrodin 2013

13) Xu ym. 2009

14) Walters ym. 2010

15) Verlicchi & Zambello 2015

16) Montagner ym. 2013

17) Österås ym. 2015

18) Yang ym. 2009

19) Holten Lützhof ym. 1999

20) Pan & Chu 2016
- 21) Carlsson ym. 2006

22) Bengtsson-Palme & Larsson 2016

23) Nowara ym. 1997

24) Milinovic ym. 2015

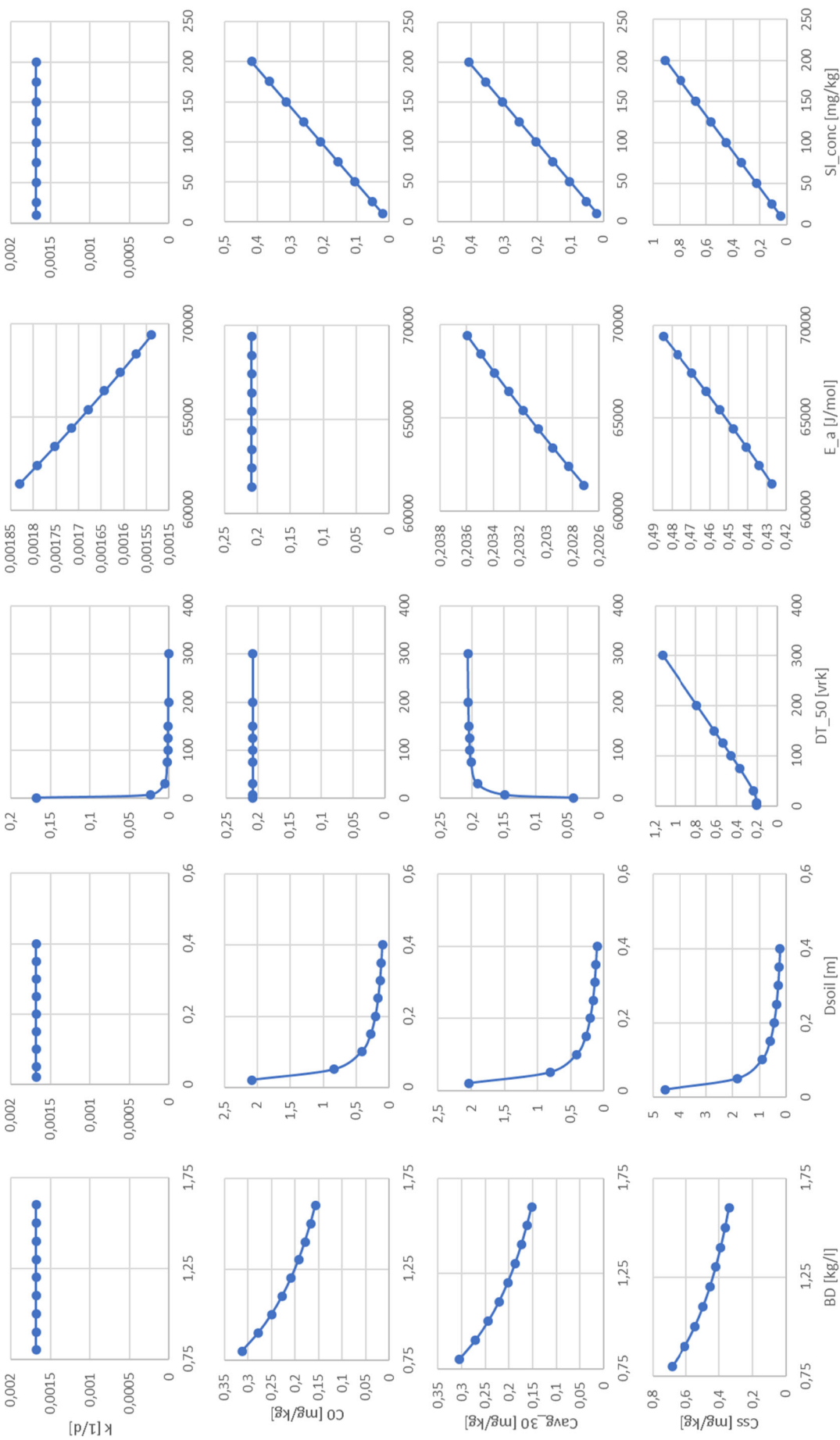
25) Hoke ym. 2012

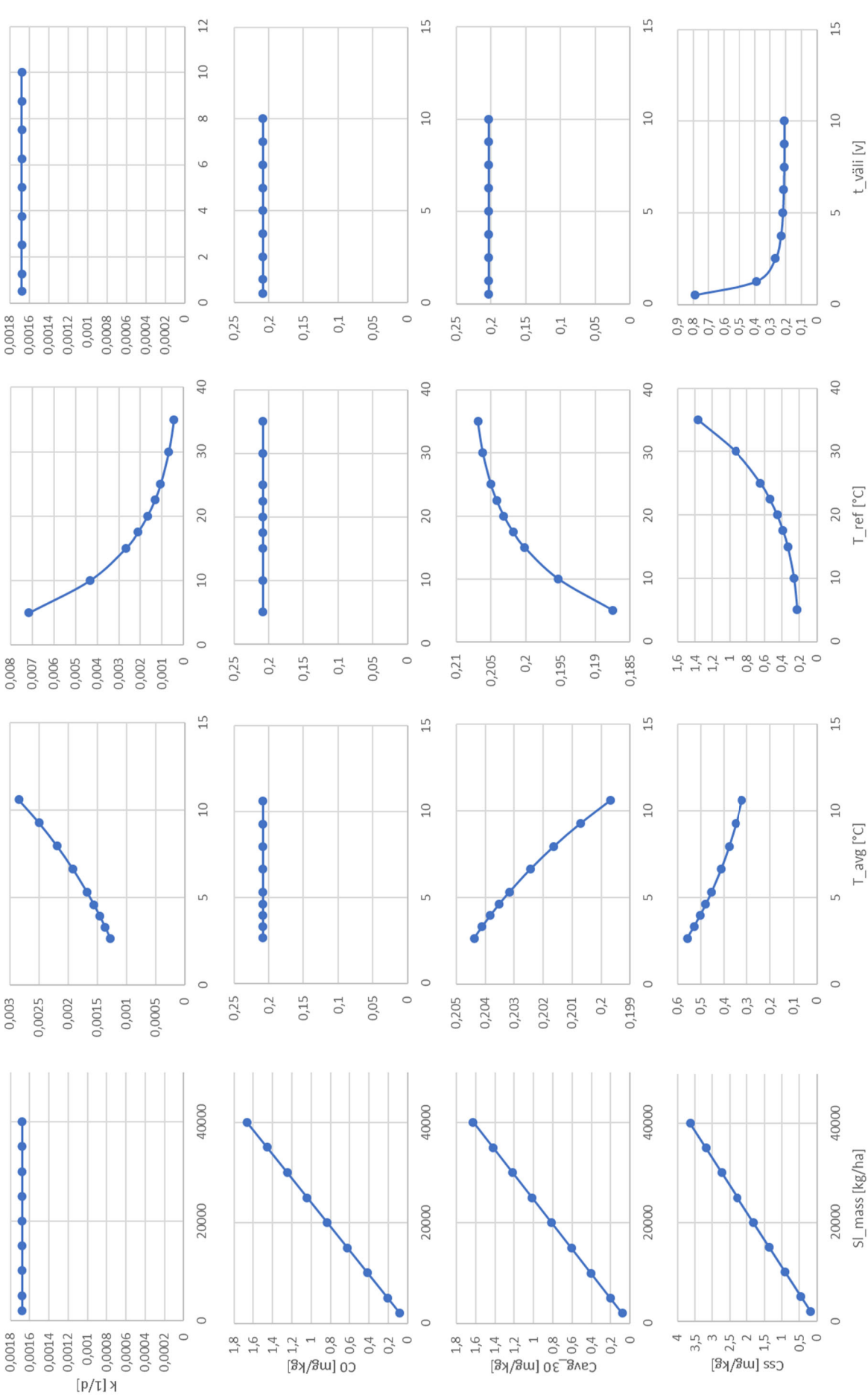
26) Ahrens ym. 2010

27) Qi ym. 2011

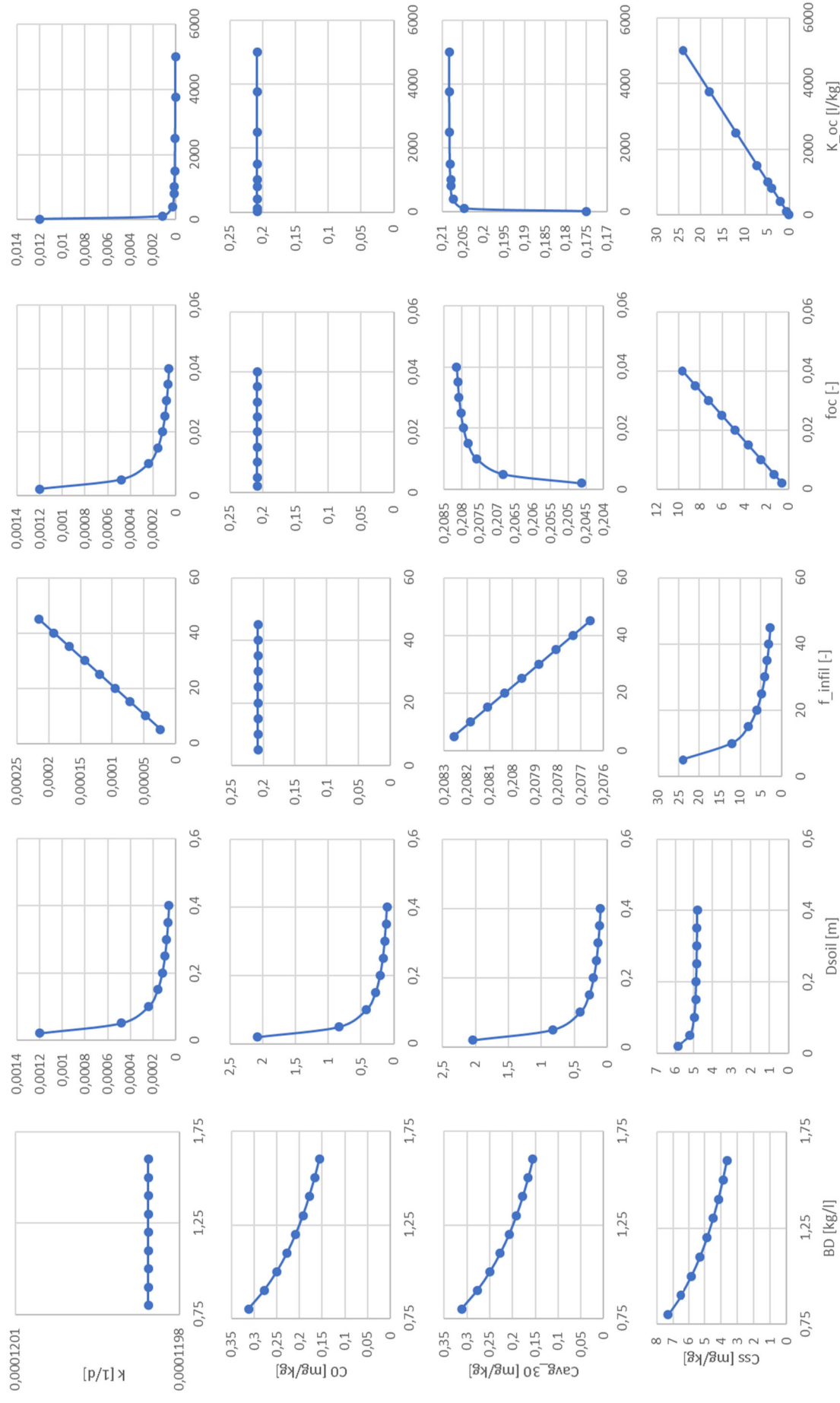
28) Amundsen ym. 2008

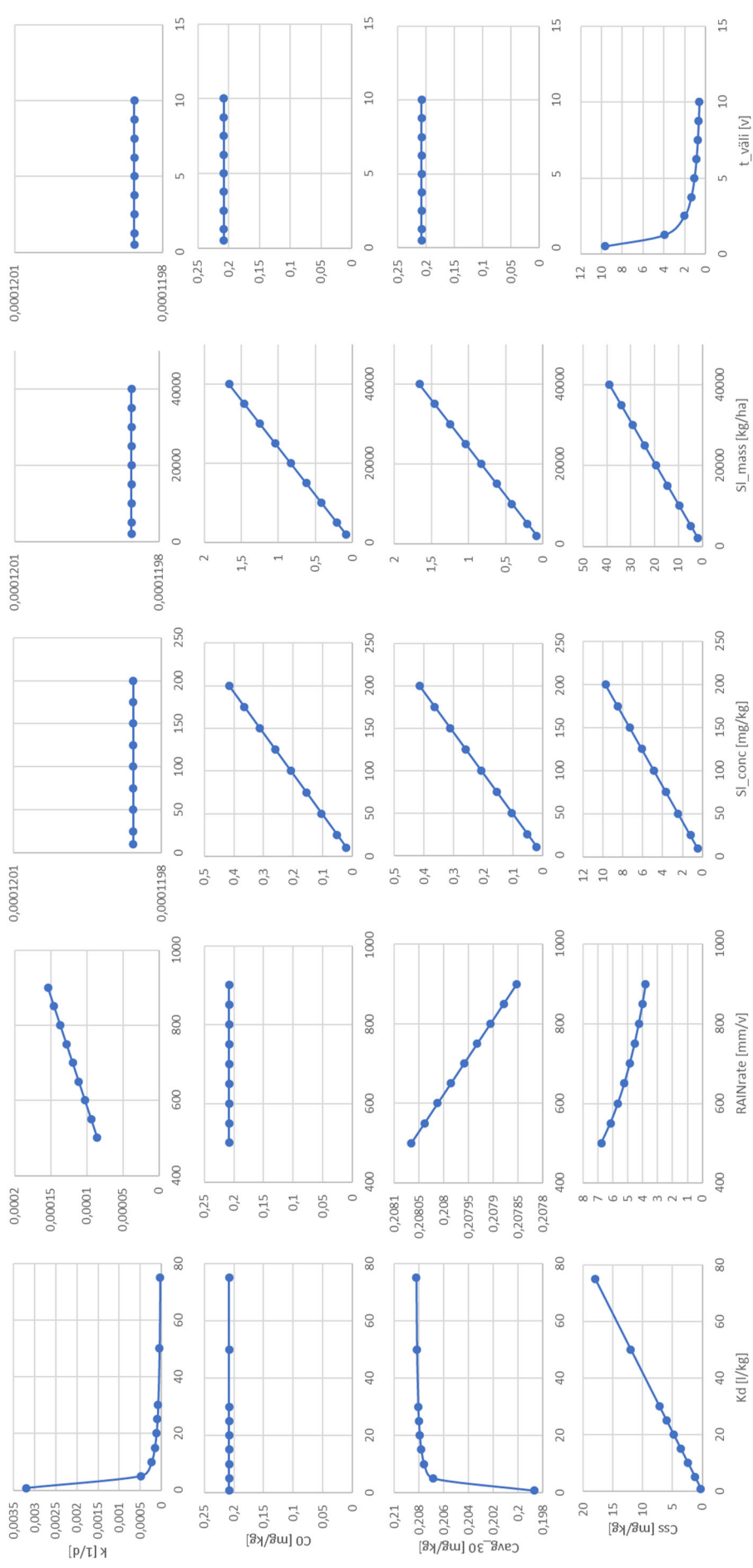
Liite 41. Hajoamalla muokauskerroksesta poistuvien yhdisteiden herkkystarkastelun tulokset.





Liite 42. Huuhtoutumalla muokkauskerroksesta poistuvien aineiden herkkyystartastelun tulokset.





Liite 43. Ympäristöriskinarvioinnissa käytetyt yhtälöt.

Nro	Yhtälö	Selite
(1)	$C_{soil}(t) = \frac{C_{sludge} \times M_{sludge} \times e^{-k \times t}}{D_{soil} \times \rho_{soil}}$	$C_{soil}(t)$ = Haitta-aineen pitoisuus maaperässä ajanhetkellä t C_{sludge} = Haitta-aineen pitoisuus levitettävässä materiaalissa M_{sludge} = Levitettävän lietteen massa D_{soil} = Muokkauskerroksen paksuus ρ_{soil} = Maaperän ominaispaino k = Haitta-aineen poistumisnopeutta kuvaava yhdistekohtainen vakio t = Ajanhetki
(2)	$k = k_{degr} + k_{leach}$	k = Haitta-aineen poistumisnopeutta kuvaava yhdistekohtainen vakio k_{degr} = Hajoamisnopeudesta johdettu poistumisvakio k_{leach} = Huuhtoutumista ohjaavista muuttujista johdettu poistumisvakio
(3)	$k_{degr} = \frac{\ln(2)}{DT_{50}} \times A$	k_{degr} = Ks. yhtälö (2) DT_{50} = Haitta-aineen puoliintumisaika maaperässä A = Arrheniuksen yhtälöllä johdettu kerroin
(4)	$A = e^{\left(\frac{E_a}{R}\right) \times \left(\frac{-1}{273+T_{avg}} + \frac{1}{273+T_{ref}}\right)}$	A = Ks. yhtälö (3) E_a = Aktivointumisenergia (oletus: 65,4 kJ/mol) R = Kaasuvakio (8,31446 J/K mol) T_{avg} = Ympäristössä toteutuva keskilämpötila (oletus: 5,3 °C) T_{ref} = Hajoamiskokeen referenssilämpötila
(5)	$k_{leach} = \frac{f_{infil} \times RAIN_{rate}}{K_d \times D_{soil}}$	k_{leach} = Ks. yhtälö (2) f_{infil} = Sadannasta maaperään imeytyvä osuus $RAIN_{rate}$ = Sadanta K_d = Maa-vesi –jakautumiskerroin
(6)	$k_d = k_{oc} \times f_{oc}$	k_d = Ks. yhtälö (5) k_{oc} = Orgaaniseen hiileen normalisoitu jakautumiskerroin f_{oc} = Maan orgaanisen hiilen osuus
(7)	$F_{acc} = e^{-365 \times k \times t_{int}}$	F_{acc} = Muokkauskerroksessa seuraavaan lietelevitykseen asti säilyvä haitta-aineen osuus k = Ks. yhtälö (2) t_{int} = Lietelevitysten välinen aika
(8)	$C_{ss} = C_{soil}(0) \times \frac{1}{1 - F_{acc}}$	C_{ss} = Haitta-aineen maaperä-pitoisuuden vaihteluvälin yläraja, kun tasapaino on saavutettu $C_{soil}(t)$ = Ks. yhtälö (1) F_{acc} = Ks. yhtälö (7)
(9)	$C_{avg}(x) = \frac{C_{soil}(0) \times (1 - e^{-x \times k})}{x \times k}$	$C_{avg}(x)$ = Haitta-aineen keskipitoisuus maaperässä ensimmäistä lietelevitystä seuraavan x vuorokauden aikana x = Keskiarvoistuksen tarkastelujakso (Käytetty arvoa 30) k = Ks. yhtälö (2) $C_{soil}(t)$ = Ks. yhtälö (1)
(10)	$F_{acc-ss} = \frac{C_{ss} - C_{soil}(0)}{C_{soil}(0)} \times 100 \%$	F_{acc-ss} = Haitta-aineen pitoisuuden suhteellinen kasvu ensimmäisen levityksen hetkellisen piikin ja tasapainopitoisuuden välillä C_{ss} = Ks. yhtälö (8) C_{soil} = Ks. yhtälö (1)
(11)	$PNEC_{soil} = \frac{K_d}{\rho_{soil}} \times PNEC_{water} \times 1000$	$PNEC_{soil}$ = Maaperässä haitattomaksi oletettu pitoisuus K_d = Ks. yhtälö (5) ρ_{soil} = Ks. yhtälö (1) $PNEC_{water}$ = Vesiympäristössä haitattomaksi oletettu pitoisuus

Nro	Yhtälö	Selite
(12)	$RQ = \frac{PEC_{soil}}{PNEC_{soil}}$	RQ = Riskiosamäärä PEC_{soil} = Laskennallinen pitoisuus maaperässä (käytetty arvoa C_{ss-max}) $PNEC_{soil}$ = Ks. yhtälö (11)
(13)	$C_{HV} = \frac{C_{sludge}}{RQ}$	C_{HV} = Pitoisuustaso, jonka ylittyessä voidaan olettaa PNEC-tason ylittyvän maaperässä erityisesti, jos lietettä levitetään toistuvasti C_{sludge} = Ks. yhtälö (1) RQ = Ks. yhtälö (12)



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000