



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2022

Metsämaiden lannoitus – katsaus kangasmaiden uusimpiin tuloksiin

Soil Fert -hankkeen loppuraportti

Antti-Jussi Lindroos, Pasi Rautio ja Hannu Ilvesniemi

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2022

Metsämaiden lannoitus – katsaus kangasmaiden uusimpiin tuloksiin

Soil Fert -hankkeen loppuraportti

Antti-Jussi Lindroos, Pasi Rautio ja Hannu Ilvesniemi

Viittausohje:

Lindroos, A.-J., Rautio, P. & Ilvesniemi, H. 2022. Metsämaiden lannoitus – katsaus kangasmaiden uusimpiin tuloksiin : Soil Fert -hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 7/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 29 s.



ISBN 978-952-380-359-6 (Painettu)

ISBN 978-952-380-360-2 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-360-2>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Antti-Jussi Lindroos, Pasi Rautio ja Hannu Ilvesniemi

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisuvuosi: 2022

Kannen kuva: Antti-Jussi Lindroos

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

Alkusanat

Puuston kasvu riippuu säätekijöistä (lämpötila, säteily, sadanta) ja kasvupaikkatekijöistä, joista keskeisimpiä ovat ravinteiden saatavuus ja maan vedenpidätysominaisuudet. Säätilaan ei yksittäinen metsänomistaja pysty omien ratkaisujensa kautta vaikuttamaan, vaikka globaalissa mittakaavassa käynnissä oleva ilmastonmuutos onkin pitkälti ihmistoiminnan aikaansaamaa. Sen sijaan maan ravinnetilan ja kosteusolosuhteiden muuttamiseen metsänomistajalla on käytettävissä tehokkaat työvälineet. Tasapainoinen ravinteiden saatavuus on metsien hyvän kasvun ja elinvoimaisuuden lähtökohta.

Lannoituksen tavoitteena on puuston kasvun parantaminen lisäämällä maahan niitä ravinteita, joita maassa on vähän suhteessa puiden tarpeeseen. Yleiskuva metsien lannoitustavoista on selkeä: kivennäismaiden metsiä kannattaa lannoittaa lähinnä typpilannoitteilla (N), turvemaiden lannoitus tapahtuu fosforia (P) ja kaliumia (K) sisältävillä lannoitteilla. Jos puuntuotannon kanssa kilpailevien tavoitteiden vuoksi osa metsien puubiomassasta jää teollisen hyötykäytön ulkopuolelle, on syytä tarkastella, millaisilla toimenpiteillä olisi mahdollista saavuttaa rajoituksesta huolimatta tarvittavan suuruinen vuotuinen, hakattavissa oleva kasvu.

Tämä raportti on tehty osana Luonnonvarakeskuksen rahoittamaa Soil Fert -hanketta, ja raportissa esitetään kirjallisuuskatsauksen lisäksi uusimpia tuloksia liittyen kangasmaiden typpi- ja tuhkalannoitukseen ja erityisesti lannoituksen vaikutukseen maaveden koostumukseen. Maa- ja vajoveden koostumuksen tutkimus on tärkeää metsän ravinnekiertotarkasteluissa, koska puiden ravinteiden otto ja myös lannoitteiden sisältämien aineiden otto tapahtuu metsämaassa olevasta vedestä. Osa esitettävistä tuloksista on EAKR-rahoitteisesta BIOTUHKA-hankkeesta (Biotuhkapohjaisten materiaalien hyödyntäminen metsämaiden lannoitteina, A70101).

Kirjoittajat

Tiivistelmä

Antti-Jussi Lindroos¹, Pasi Rautio² ja Hannu Ilvesniemi¹

¹Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

²Luonnonvarakeskus (Luke), Ounasjoentie 6, 96200 Rovaniemi

Pohjoismaiden kangasmetsissä yksi tärkeimmistä kasvua rajoittavista tekijöistä on käyttökelpoisen typen puute, ja typpilannoituksella pyritään tämän puutteen korjaamiseen. Tyypillisimmät lannoitusmäärät lehtomaisten ja tuoreiden kankaiden kuusikoille ovat Etelä-Suomessa 150 ja Pohjois-Suomessa 120 kg/ha yhdellä lannoituskerralla. Tuoreen kankaan ja kuivahkon kankaan männiköille suositeltavat lannoitusmäärät ovat samansuuruiset. Typpilannoituksen vaikutus puuston tilavuuskasvuun on merkittävää paitsi metsätaloudellisesti myös metsäekosysteemin hiilivarastojen kasvattamisen kannalta. Puuston kasvu sitoo hiiltä, ja lisääntyvä kariketuo-
tanta lisää maaperän hiilivarastojen kasvua.

Tässä raportissa esitellyt tulokset Etelä-Suomen kuusikoissa ja Pohjois-Suomen männiköissä tehdyssä kokeissa tukevat käsitystä, että typpilannoituksen mukana maahan tuleva typpi pidättyy suurelta osaltaan metsäekosysteemin puustoon, pintakasvillisuuteen ja maaperään Suomessa käytössä olevilla lannoitusmäärillä.

Typpilannoituksen lisäksi kangasmailla voidaan käyttää myös tuhkalannoitusta joko sellaisenaan tai yhdessä typpilannoituksen kanssa. Tuhkalannoitusta voidaan käyttää, kun halutaan palauttaa metsäekosysteemiin sieltä esimerkiksi puunkorjuussa menetettyjä ravinteita. Tuhkalannoitus voi myös vaikuttaa typen vapautumiseen orgaanisesta aineesta epäorgaaniseksi muodoiksi, jotka ovat kasveille helposti käyttökelpoisia. Tuhkalannoituksen on myös raportoitu kohoittavan neulasten booripitoisuuksia. Näin ollen tuhkan käyttö lannoitteena sopii kangasmetsiin, joissa esiintyy boorin puutosta. Tosin jotkin tuhkalaadut saattavat vaatia boorilisän, jotta ne toimivat myös boorilannoitteina.

Etenkin tuhkan sisältämien raskasmetallien on pelätty aiheuttavan ongelmia. Etelä-Suomen kuusikoissa ja Pohjois-Suomen männiköissä tehdyissä kokeissa maaveden seuranta ei kuitenkaan paljastanut merkittävästi kohonneita raskasmetallipitoisuuksia verrattuna lannoittamattomaan kontrollialaan.

Asiasanat: tuhkalannoitus, typpilannoitus, kangasmaat, maavesi, vajovesi, huuhtoutuminen

Sisällys

1. Typpilannoitus kangasmailla.....	6
1.1. Vaikutus puuston kasvuun, maaperään ja huuhtoutumiseen	6
1.2. Typpilannoituksen vaikutus huuhtoutumiseen – uusimpia tuloksia lannoituskokeelta Etelä-Suomessa.....	8
1.3. Typen vapautuminen maaveteen erilaisista lannoitteista – uusimpia tuloksia lannoituskokeelta Pohjois-Suomessa.....	9
2. Tuhkalannoitus kangasmailla.....	13
2.1. Vaikutus ravinteisiin ja huuhtoutumiseen	13
2.2. Tuhkalannoitus ja boori.....	14
2.3. Uusimpia tuloksia tuhkalannoituksen vaikutuksesta typen kiertoon	16
2.4. Tuhkalannoituksen merkitys emäsravinnetaseen parantajana ja ylläpitäjänä kangasmailla – esimerkki ravinnetaseesta eteläsuomalaisessa kuusikossa	18
2.5. Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan veden raskasmetallipitoisuuksiin – uusia tuloksia pohjoissuomalaisesta männiköstä.....	19
2.6. Tuhkalannoitusmäärien kasvattamisen hyödyt ja haitat kangasmailla – uusia tuloksia eteläsuomalaiselta kuusikolta	22
3. Yhteenveto.....	24
Viitteet.....	25

1. Typpilannoitus kangasmailla

1.1. Vaikutus puuston kasvuun, maaperään ja huuhtoutumiseen

Typpilannoituksen puuston tilavuuskasvua lisäävä vaikutus on hyvin tunnettu suomalaisilla kangasmailla (esim. Mälkönen 2003, Saarsalmi ym. 2006). Typpilannoituksen kasvua lisäävä vaikutus johtuu kasveille käyttökelpoisen typen puutteen korjaamisesta, sillä yksi tärkeimmistä kasvua rajoittavista tekijöistä Pohjoismaiden kangasmetsissä on juuri käyttökelpoisen typen puute (Högberg ym. 2017). Kangasmaiden lannoituksen yleisohjeiden (Kaunisto ym. 2002) mukaan lehtomaisten ja tuoreiden kankaiden kuusikoille ja tuoreen kankaan männiköille suositeltavat typpilannoitusmäärät ovat Etelä-Suomessa 150 ja Pohjois-Suomessa 120 kg/ha yhdellä lannoituskerralla. Samanlainen suositus on myös kuivahkon kankaan männiköille. Esimerkiksi Mälkösen (1982) mukaan päätehakkuikäisissä männiköissä Itä-Suomessa saatiin 150 kg N/ha lannoituksella kasvunlisäystä 8–14 m³/ha ja kuusella hieman vähemmän. Oulunsalpietari (ammoniumnitraatti) antoi suuremman kasvunlisäyksen kuin urealannoitus. Typpilannoitemäärien kasvattaminen toi kasvunlisäystä molemmille puulajeille merkittävästi lisää. Kasvunlisäys on tyypillisesti kangasmailla 6–20 m³/ha (Nilsen 2001, Nohrstedt 2001, Saarsalmi & Mälkönen 2001). Yhden edellä mainitun suuruisen typpilannoituskerran on arvioitu vaikuttavan kasvua lisäävästi 6–8 vuotta männiköissä ja hieman pidempään kuusikoissa, 8–10 vuotta. Sen sijaan koivikoissa vaikutusaika kasvuun on huomattavasti lyhyempi eli noin 3–5 vuotta. Typpilannoitus ei myöskään lisää puuston kasvua koivulla yhtä paljon kuin männyllä ja kuusella. Vaikutusajan jälkeen tehtävä uusintalannoitus tuo edelleen lisää kasvua (Mälkönen 2003).

Typpilannoitus lisää maaperän orgaanisen aineen sekä typen määrää. Mälkösen ym. (1990) mukaan humuskerroksen orgaanisen aineen määrä lisääntyi 20 vuoden kuluessa (lannoitus n. 300 kg N/ha) lannoitetuilla aloilla selvästi verrattuna lannoittamattomiin kontrollialoihin. Lisäys oli männiköissä keskimäärin 42 % yksittäisten kokeiden muutosprosenttien perusteella lasketuna (koko aineistossa kontrollialoilla orgaanista ainetta humuskerroksessa keskimäärin n. 22 t/ha, N-lannoitusaloilla n. 28 t/ha) ja kuusikoissa 46 % (kontrollialoilla orgaanista ainetta humuskerroksessa n. 22 t/ha, N-lannoitusaloilla n. 30 t/ha). Yksittäisten kokeiden perusteella lasketut suhteelliset lisäykset olivat jonkin verran suurempia kuin laskettaessa koko aineiston keskimääräisen orgaanisen aineen lisääntymisen perusteella, mutta orgaanisen aineen lisääntyminen humuskerroksessa typpilannoituksen seurauksena ja lisäyksen suuruusluokka olivat samanlaisia eri tavoin laskettaessa. Typen lisääntyminen oli vastaavasti humuskerroksessa 55 % männiköissä (kontrolli n. 300 kg N /ha, N-lannoitus n. 450 kg N /ha) ja 43 % kuusikoissa (kontrolli n. 450 kg N /ha, N-lannoitus n. 600 kg N /ha). Vastaavasti typen lisääntyminen kivennäismaassa oli 23 ja 10 %. Nohrstedtin ym. (1994) mukaan männikköön 20 vuoden aikana lisäystä tpeestä noin puolet oli pidättynyt pintakasvillisuuteen ja maaperän ylimpään 10 senttimetriin. Lannoitteena annettusta tpeestä merkittävä osa pidättyy myös puustoon ja juuriin (Melin & Nömmik 1988). Nömmik & Larsson (1989) raportoivat, että 60 % lannoitteena annettusta tpeestä pidättyi ruotsalaisessa kokeessa männikön puuston maanpäällisiin osiin sekä maaperään (humuskerros ja kivennäismaa 0–32 cm). Puustoon kertyi 36 % lisäystä tpeestä (Nömmik & Larsson 1989).

Typpilannoituksella on raportoitu olevan pitkäaikaisia negatiivisia vaikutuksia mikrobibiomasseen ja hiilen mineralisaatioon kangasmailla, mutta typen nettomineralisaatio on vilkastunut lannoituksen seurauksena (mm. Nohrstedt ym. 1989, Smolander ym. 1994, 1995).

Typpilannoituksen vaikutus puuston tilavuuskasvuun on merkittävää paitsi metsätaloudellisesti niin myös metsäekosysteemin hiilivarastojen kasvattamisen kannalta. Puuston kasvu sitoo hiiltä

ja lisääntyvä kariketuotanto vaikuttaa maaperän hiilivarastojen kasvua lisäävästi. Maanpäällisen ja -alaisen kariketuotannon oletetaan olevan yksi keskeisimmistä tunnuksista maaperän hiilivaraston kehityksessä (esim. Tupek ym. 2019), millä on puolestaan tärkeä rooli arvioitaessa metsien roolia hiilen sidonnassa liittyen ilmaston muutoksen hillintään.

Vaikka typen saatavuuden lisääntyminen kangasmailla johtaa jo sinänsä puuston kasvun lisääntymiseen, niin yhdessä maaperän kosteuden lisääntymisen kanssa kasvureaktio voi olla vieläkin voimakkaampi (Linder 1987, Nöjd ym. 2009). Linder (1987) raportoi Keski-Ruotsissa männyn pohjapinta-alan kasvun olleen suurinta aloilla, joita sekä kasteltiin että lannoitettiin typellä 11 vuoden ajan. Bergh ym. (1999) puolestaan havaitsivat kuusikoiden tilavuuskasvun jopa nelinkertaistuneen typpilannoituksen ja kastelun yhteisvaikutuksen ansiosta verrattuna lannoittamattomaan ja kastelemattomaan kontrollialaan. Samanlaiseen havaintoon päädyttiin myös suomalaisen tekopohjavesialueen tutkimuksissa Keski-Suomessa, missä järviseden sadettaminen kuivan kankaan männikön metsämaahan lisäsi mäntyjen pohjapinta-alan kasvun kaksinkertaiseksi kastelemattomaan alaan verrattuna (Nöjd ym. 2009). Myös neulasten typpipitoisuudet nousivat kastelun seurauksena (Nöjd ym. 2009). Suuri pohjapinta-alan kasvun lisäys liittyi todennäköisesti ennen kaikkea typen saatavuuden parantumiseen. Sadetetut järvidesimäärät olivat erittäin suuria sademäärään verrattuna, jolloin myös metsämaahan tullut typpimäärä kohosi varsin suureksi. Järviseden pH on myös lähellä neutraalia, mikä vähentää metsämaan happamuutta ja antaa normaalia tilannetta paremmat edellytykset nitraatin muodostukselle (Paavolainen ym. 2000a, b, Nöjd ym. 2009). Sadetusimeytysalueilla veden saatavuuden lisääntymisellä on todennäköisesti myös tärkeä merkitys kasvun lisääntymisessä (Nöjd ym. 2009). Nämä tutkimukset osoittavat, että puuston kasvun lisäys kangasmailla typpilannoituksen ansiosta voi olla vieläkin merkittävämpää silloin, kun veden saatavuus maaperässä on turvattu.

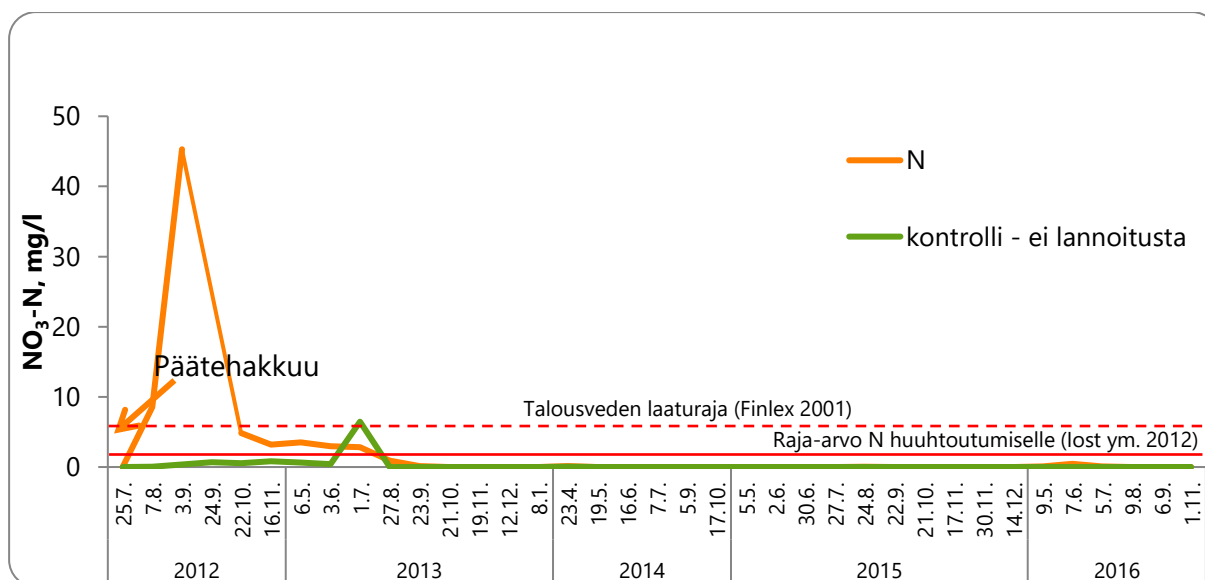
Typpilannoituksella pyritään kohottamaan maaveden typen puustolle ja kasvillisuudelle käyttökelpoisten muotojen kuten ammonium- ja nitraattitypen pitoisuuksia. Puusto ja aluskasvillisuus käyttävät näitä epäorgaanisen typen muotoja niin tehokkaasti hyväkseen ravinteiden otossa, että ammonium- ja nitraattitypen huuhtoutuminen on olematonta metsäekosysteemeistä Suomessa (Mustajärvi ym. 2008). Suomalaisista metsäekosysteemeistä ei ole havaintoja, että ne olisivat saavuttaneet typellä kyllästymisen astetta, joka johtaisi nitraattitypen huuhtoutumiseen metsämaasta pohjaveteen. Maaperän C/N-suhde voi osittain indikoida metsäekosysteemin kyllästymistä typellä esimerkiksi suuren typpilaskeuman alueilla kuten on tapahtunut monin paikoin Keski-Euroopassa (Waldner ym. 2014). C/N-suhteen ollessa alle 25 orgaanisessa kerroksessa riski typen huuhtoutumiselle kohoaa (Gundersen ym. 1998). Raja-arvo ei tarkoita sitä, että metsämaat olisivat aina typellä kyllästyneitä raja-arvon alapuolella, mutta riski huuhtoutumiselle lisääntyy. Keski-Euroopassa suuren typpilaskeuman alueilla vajoveden nitraattityppipitoisuudet ovat paikoin selvästi kohonneet, mikä indikoi metsäekosysteemien kyllästymistä typellä (Iost ym. 2012).

Vähäinen typen huuhtoutuminen kangasmailta voi päätehakkuun yhteydessä lisääntyä hetkelisesti lannoittamattomalla metsämaalla (Lindroos ym. 2016). Hakkuualalle jätetyt suuret hakkuutähdekasat voivat myös lisätä paikallisesti typen huuhtoutumismääriä (Lindroos ym. 2016). Hakkuun ja hakkuutähteiden vaikutus huuhtoutumiseen on kuitenkin havaittu lyhytaikaiseksi ilmiöksi. Smolanderin ym. (1995, 1998, 2000) mukaan kuusikon lannoituskokeella metsämaan vajoveden kokonaistyppipitoisuudet olivat korkeimmat typpilannoituskäsittelyssä ja yhdistetyssä typpi- ja kalkituslannoituskäsittelyssä (molemmissa typpeä annettiin 860 kg N /ha 30 vuoden aikana) verrattuna lannoittamattomaan kontrollikäsittelyyn ennen avohakkuuta. Vajoveden kokonaistyppipitoisuus koostui pääosin nitraattitypestä, joka liikkuvana anionina huuhtoutuu helposti. Smolander ym. (2001) mukaan avohakkuu lisäsi nitraattipitoisuuksia maavedessä, mutta aiemmat typpilannoitukset kuusikon pitkäaikaisella kokeella eivät lisänneet

nitraattipitoisuuksia verrattuna pelkkään avohakkuuseen (lannoittamaton kontrolli). Myöskään Ringin (1995) mukaan tavanomaisia typpilannoitusmääriä vastaavat lannoitukset eivät lisänneet typen huuhtoutumista avohakkuun jälkeen verrattuna lannoittamattomaan tilanteeseen.

1.2. Typpilannoituksen vaikutus huuhtoutumiseen – uusimpia tuloksia lannoituskokeelta Etelä-Suomessa

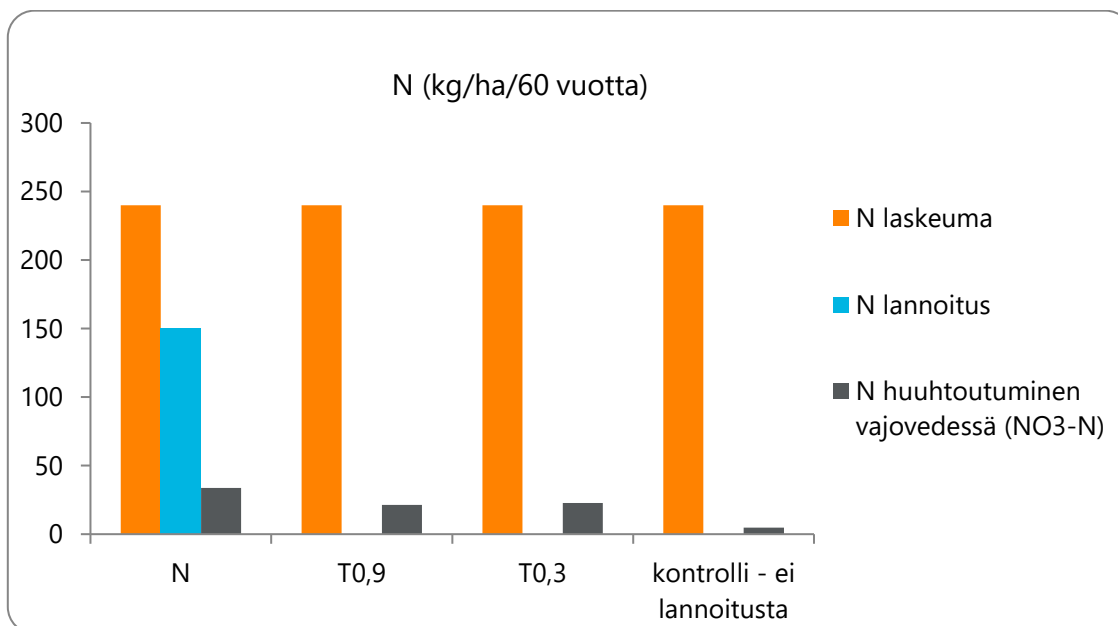
Metsämaan vajoveden nitraattitypen pitoisuuden nousu typpilannoituksen seurauksena verrattuna lannoittamattomaan käsittelyyn havaittiin selvänä kuusikon lannoituskokeessa Etelä-Suomessa, missä typpeä annettiin 150 kg/ha päätehakkuun jälkeen korvaamaan hakkuutähteissä poistuvia typpimääriä (Kuva 1). Typpilannoituksen vuoksi kohonnut vajoveden nitraattitypen pitoisuudet alenivat kuitenkin hyvin nopeasti matalalle tasolle, sillä jo seuraavana vuonna lannoituskäsittelystä pitoisuudet olivat laskeneet alle kohonneena pidettyjen pitoisuustasojen (Finlex 2001, lost ym. 2012). Kuusikon päätehakkuu itsessään aiheutti myös vain lyhytaikaista nitraattipitoisuuksien kohoamista (lannoittamaton kontrolliala) (Kuva 1).



Kuva 1. Vajoveden nitraattityppipitoisuus Lapinjärvellä sijaitsevalla kuusikon päätehakkuukohteella syvyydellä 40 cm maan pinnasta. N=typpilannoituskäsittely 150 kg/ha. Kontrolli=e-i lannoitusta.

Typen huuhtoutumismäärä (kg/ha) vajoveden mukana metsämaan pintaosasta on vastaavasti suurimmillaan heti lannoituksen jälkeen kuten myös pitoisuudetkin, mutta huuhtoutumismääräkin laski eteläsuomalaisella lannoituskokeella matalalle tasolle nopeasti. Metsäekosysteemiin laskeuman ja lannoituksen mukana tulevien ja sieltä vajoveden mukana poistuvien typpimäärien tase mustikkatypin kuusikossa Etelä-Suomessa on esitetty kuvassa 2. Laskennassa on huomioitu koko kiertoajan kuluessa metsäekosysteemiin kohdistunut typpilaskeuma (240 kg N/60 vuotta), sillä kumulatiivisen laskeuman on oletettu liittyvän paremmin metsän typpitaseeseen kuin lyhyen ajan laskeuman (Forsius ym. 2021). Kiertoajalle määritetty laskeuma perustuu vuosina 1995–2018 aikana tehtyyn metsiin kohdistuvan laskeuman seurantaan (Mustajärvi ym. 2008, Merilä ym. 2014). Kiertoajan laskeumataso on varsin vertailukelpoinen hyvin pitkäaikaiseen (1880–2020) laskeumatason nähden Etelä-Suomessa (500–1000 kg N/ha/140 vuotta, EMEP, Schöpp ym. 2003, Forsius ym. 2021). Vaikka huuhtoutumamäärät päätehakkuun

jälkeisinä vuosina ovat nousseet lyhytaikaisesti ja myös typpilannoitus lisää lyhytaikaisesti huuhtoutumismääriä, niin koko kiertoajalle suhteutettuna (60 vuotta) typen syöte metsämaahan (laskeuma ja lannoitus) on huomattavan suuri (390 kg/ha) verrattuna poistumaan, joka vajoveden mukana (30 kg/ha) on vain pieni osa syötteestä. Metsämaahan kohdistuva typen kokonaismäärä vuositasolle laskettuna jää myös alle tasosta 8–10 kg N/ha/v, mikä on liitetty nitraattitypen huuhtoutumisen mahdolliseen lisääntymiseen (Dise ym. 2009, Forsius ym. 2021). Tulokset tukevat käsitystä, että typpilannoituksen mukana maahan tuleva typi pidättyy suurelta osaltaan metsäekosysteemin puustoon, pintakasvillisuuteen ja maaperään Suomessa käytössä olevilla lannoitusmäärillä.



Kuva 2. Kiertoajan kuluessa (60 vuotta) metsämaahan tuleva typen määrä laskeumassa ja typpilannoituksessa verrattuna poistuviin typpimääriin vajoveden mukana (huuhtoutuminen) Lapinjärven lannoituskokeella (kuusikko). N=typpilannoituskäsittely 150 kg/ha. T0,9=Tuhkalannoituskäsittely 0,9 kg/m² eli 9000 kg/ha. T0,3=Tuhkalannoituskäsittely 0,3 kg/m² eli 3000 kg/ha. Kontrolli=e-i lannoitusta.

1.3. Typen vapautuminen maaveteen erilaisista lannoitteista – uusimpia tuloksia lannoituskokeelta Pohjois-Suomessa

Typpilannoituksen ravinnehyötysuhdetta voidaan arvioida metsäekosysteemiin sitoutuneiden ravinteiden määrän ja siitä saatavan puuston kasvun lisäyksen suhtena maaperästä poistuviin typpimääriin nähden. Lannoituksen voidaan katsoa onnistuvan optimaalisesti, kun puuston kasvuvaste saavutetaan ja huuhtoutumismäärät saadaan minimoitua. Erilaiset lannoitetyypit voivat käyttäytyä hyvinkin eri tavoin ravinnelähteinä, paitsi ravinnemääriltään niin myös ravinteiden vapautumisnopeudeltaan.

Nopealiukoiset lannoitteet antavat tehokkaan ravinnelisäyksen lyhyellä aikavälillä, kun taas hidasliukoiset lannoitteet vapauttavat ravinteita vähittäin pitkällä aikavälillä. Kivalossa Pohjois-Suomessa toteutettiin osana EAKR-rahoitteista BIOTUHKA-hanketta (EAKR A70101) tutkimus, (Rautio ym. käsikirjoitus), jossa verrattiin erilaisia typpilannoitteita ja puun tuhkaa. Tarkoituksena oli verrata eri lannoitteiden vaikutusta typen vapautumisnopeuteen maaperän veteen.

Puuntuhkan vaikutus metsämaan sisäiseen typen kiertoon voi teoriassa olla välillinen siten, että happamuuden vähentyminen saattaisi suotuisissa oloissa stimuloida sisäistä typen kiertoa esimerkiksi käynnistämällä nitraatin muodostumista. Sen vuoksi puuntuhkaa tutkittiin typpilannoitteiden rinnalla. Tutkittavat lannoitekäsittelyt olivat tuhka (Suosiolan tuhkaräe, 3000 kg/ha), biokaasulaitoksen mädätysjätteestä tehty SYVAB Bionäring (2640 kg/ha = typpeä 120 kg/ha) ja Suomensalpietari (450 kg/ha = typpeä 120 kg/ha). Vuodesta 2017 lähtien tutkittiin myös uutta hankkeessa kehitettyä typpilannoitetta (sahanpuru-ammonium-N-lannoite). Lisäksi vertailuna oli lannoittamaton käsittely. Lannoituskokeen pääpuulaji oli mänty, ja maaperä koostui lajittuneesta hiekasta.

Nitraattitypen ($\text{NO}_3\text{-N}$)-pitoisuudet olivat metsämaan vajovedessä hyvin matalia ennen lannoitusta sekä lannoittamattomalla alalla koko mittausjakson ajan, mikä on tyypillistä suomalaisille metsämailla (Kuva 3). Suomensalpietarista (ammoniumnitraatti) vapautui heti lannoituksen jälkeen voimakkaasti nitraattityppeä maan pintaosan vajoveteen, mutta pitoisuudet alenivat nopeasti kahdessa kuukaudessa. Osa nitraatista huuhtoutui maakerroksen läpi ja huuhtoutuminen näkyy syvemmillä maassa viiveellä ja pintamaahan nähden selvästi alentuneina pitoisuuksina. Muut lannoitteet eivät vaikuttaneet merkittävästi nitraattitypen pitoisuuksiin, ja pitoisuudet olivat hyvin matalia myös maaperän syvemmissä osissa.

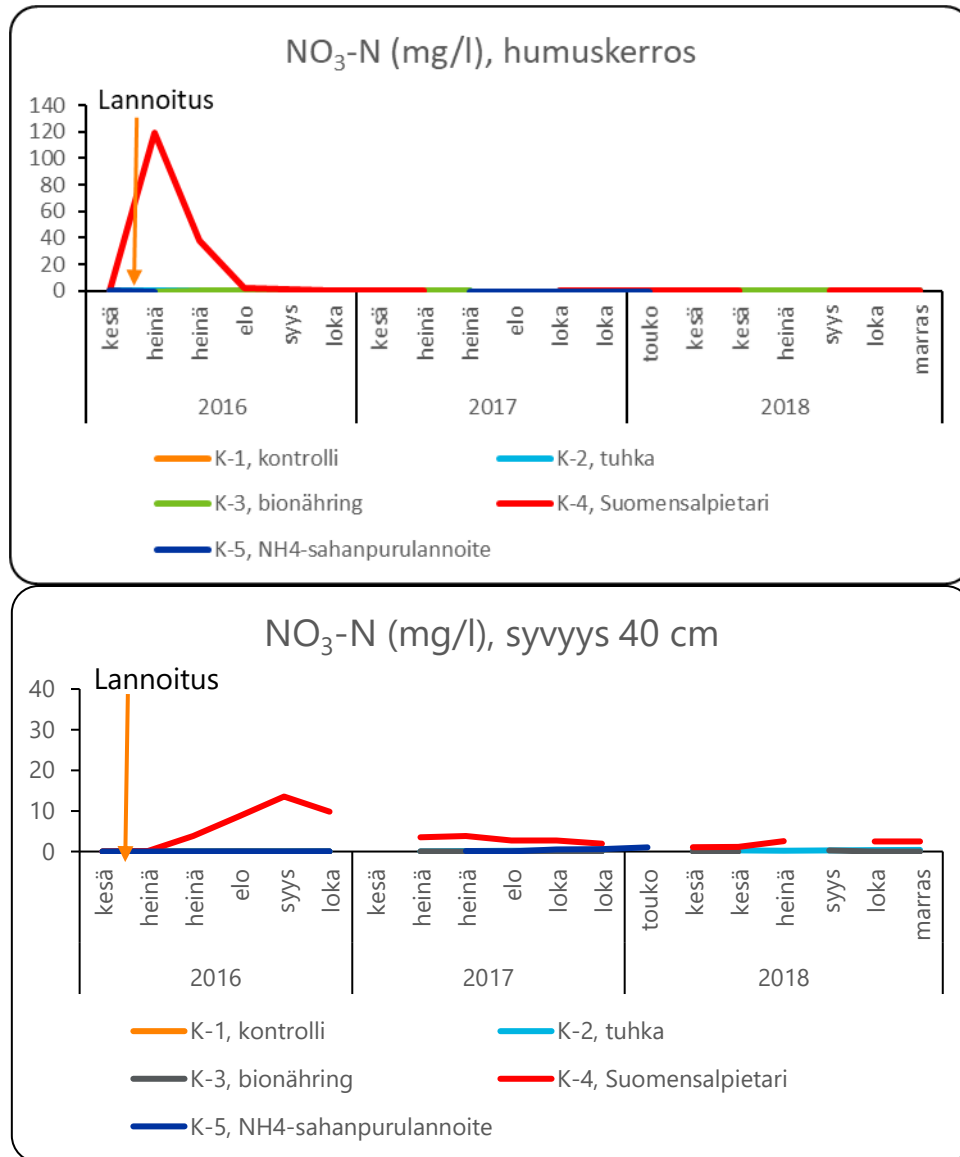
Ammoniumtyppeä oli maan pintaosan vajovedessä runsaasti heti lannoituksen jälkeen Suomensalpietariruuduilla (ammoniumnitraatti), mutta pitoisuudet alenivat nopeasti (Kuva 4). Myös orgaanisen typpilannoitteen (Bionäring) aloilla maan pintaosan vajovedessä ammoniumtyppipitoisuudet kohosivat, mutta kohoaminen alkoi hitaammin kuin Suomensalpietarilla. Sahanpuru-ammonium-N-lannoite lisäsi niin ikään maan pintaosan ammoniumtypen pitoisuutta selvästi. Ammoniumin huuhtoutuminen juuristovyöhykkeen alapuolelle oli vähäistä kaikilla lannoitteilla.

Orgaanisella Bionäringillä lannoitetuilla ruuduilla merkittävin muoto, jossa typpeä maan pintaosan vajovedessä esiintyi, oli orgaanisesti sidottu typpi. Bionäring-ruuduilla kokonaistyyppipitoisuus kohosi korkeimmalle tasolle nopeasti lannoituksen jälkeen.

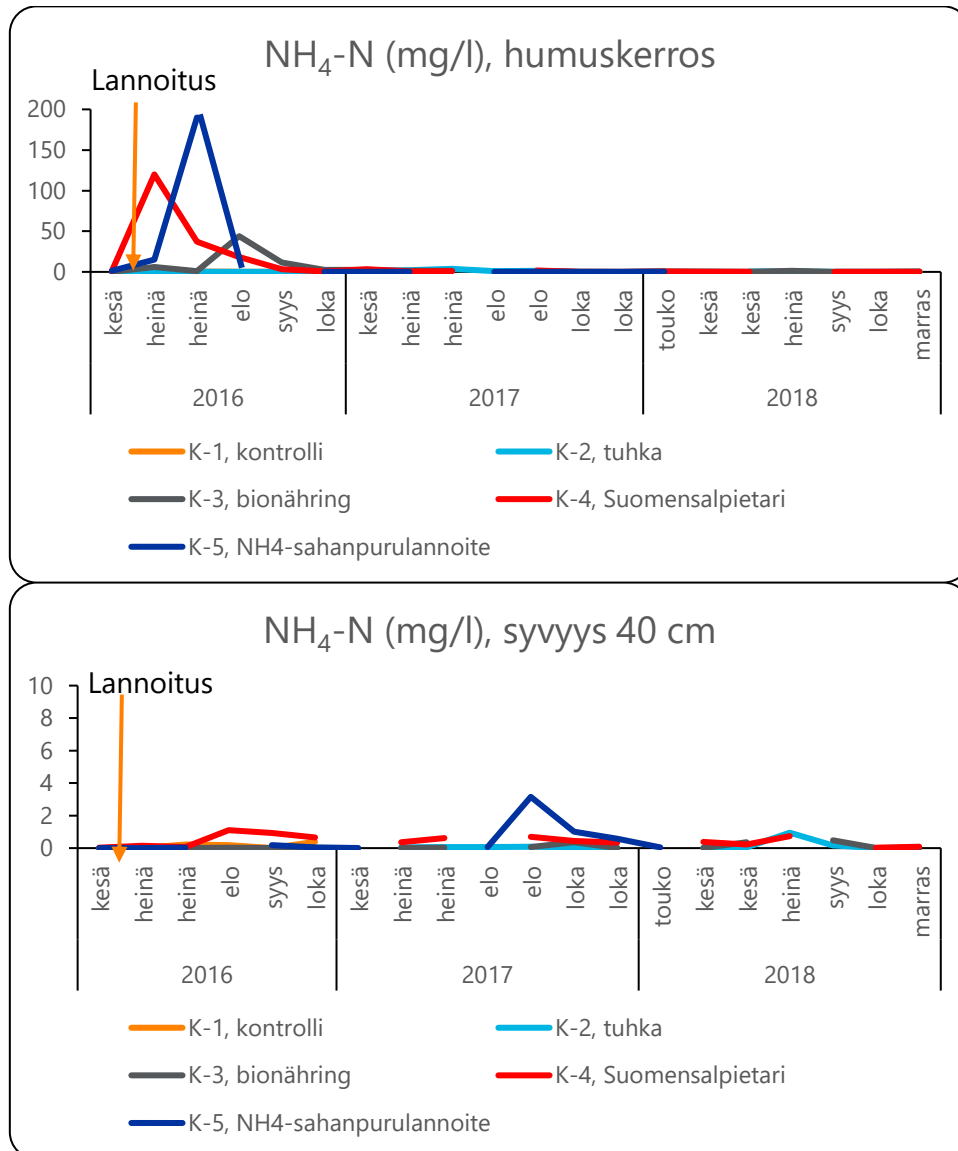
Vertailu osoitti joitain eroja perinteisen typpilannoitteen (Suomensalpietari eli ammoniumnitraatti) ja orgaanisten typpilannoitteiden sekä sahanpuru-ammonium-N-lannoitteen liukenemisen käynnistymisessä. Lannoitteet ovat myös osin eri typen muotojen lähteitä maaperän vedelle ja edelleen kasvillisuudelle ja puustolle. Kenttäkokeen tulos oli myös yhteneväinen laboratoriokokeena tehdyn uuttokokeen kanssa (Rautio ym. käsikirjoitus). Suomensalpietari oli lannoitteista selvästi helpoiten liukeneva, ja se vaikutti vapauttamiensa epäorgaanisten typen muotojen (NH_4 , NO_3) osalta veden pitoisuuksiin voimakkaasti heti lannoittelisäyksen jälkeen. Orgaaninen typpilannoite ja sahanpurulannoite vapauttivat ammoniumtyppeä hieman viiveellä verrattuna perinteiseen Suomensalpietariin. Orgaaniset typen muodot esiintyivät suurina pitoisuuksina orgaanisessa lannoitteessa.

Ammoniumtyppi on kaikkein parhaiten kasvillisuudelle käytettävässä muodossa, jota orgaaniset lannoitteet ja sahanpurulannoite kuten myös perinteinen ammoniumnitraatti-lannoite vapauttivat runsaasti. Orgaaninen typpilannoite vapautti myös runsaasti orgaanista typpeä, josta tietyt muodot ovat myös kasveille helposti käytettävissä ja sitoutuvat tehokkaasti. Suomensalpietari vapautti nitraattityppeä runsaasti ja nopeasti, ja myös se on kasveille käyttökelpoisessa muodossa, mutta ei anionimuotonsa vuoksi niin helposti sitoutuvassa muodossa kuin ammonium. Sen vuoksi nitraattia vapauttavat lannoitteet voivat aiheuttaa lyhytaikaista nitraattitypen huuhtoutumista, mikä tässäkin lannoituskokeessa havaittiin viiveellä lannoituslisäyksestä. Sen sijaan vain ammoniumia vapauttavista lannoitteista ei ammoniumtyppeä (tai teoriassa nitrifikaation kautta muuntuvaa nitraattityppeä) juurikaan huuhtoutunut juuristovyöhykkeen alle.

Typpilannoitukseen liittyviä huuhtoutumistutkimuksia on tehty varsin runsaasti, ja tulokset eivät aina ole olleet yhteneväisiä. Tässä tutkimuksessa havaittiin selvä yhteys nitraatin lievän huuhtoutumisen ja nitraattia sisältävän lannoitteen välillä. Huuhtoutuminen oli kuitenkin vähäistä lannoitusmäärään nähden. Typpilannoitteiden ammoniumtyypeä tai orgaanisia typen muotoja ei huuhtoutunut merkittävästi.



Kuva 3. Nitraattitypen esiintyminen metsämaan vajovedessä orgaanisen kerroksen ja juuristovyöhykkeen alla eri lannoitekäsittelyillä Kivalon lannoituskokeella (Rautio ym. käsikirjoitus).



Kuva 4. Ammoniumtyypen esiintyminen metsämaan vajovedessä orgaanisen kerroksen ja juuristovyöhykkeen alla eri lannoitekäsittelyillä Kivalon lannoituskokeella (Rautio ym. käsikirjoitus).

2. Tuhkalannoitus kangasmailla

2.1. Vaikutus ravinteisiin ja huuhtoutumiseen

Puuntuhka sisältää kaikkia keskeisiä ravinteita puuston kannalta oikeassa suhteessa lukuun ottamatta tyypeä, joka haihtuu puun palaessa (Karlton ym. 2008). Tuhkalannoitusta voidaankin käyttää, kun halutaan palauttaa metsäekosysteemiin sieltä esimerkiksi puunkorjuussa menetettyjä ravinteita (Mälkönen 2003, Huotari 2012). Varsinkin kokopuun korjuussa ravinnepoistumat ovat suurempia kuin pelkästään perinteisessä runkopuunkorjuussa (Ukonmaanaho ym. 2008). Tuhkalannoitukselle on tyypillistä, että sillä on neutraaloiva eli maan pH:ta nostava vaikutus ja se lisää kokonaisravinnevaroja pitkäaikaisesti (Eriksson 1998, Eriksson ym. 1998, Saarsalmi ym. 2001, Saarsalmi ym. 2014). Happamuuden vähentyminen liittyy neutralointivaikutuksen lisäksi emäskationien lisääntymiseen maaperässä, mikä lisää maaperän puskurikykyä eli vastustuskykyä luontaisia happamoittavia tekijöitä vastaan.

Tuhkalannoitus voi myös vaikuttaa mm. happamuuden vähenemisen kautta hiilen kiertoon. Hiilen kierron mikrobiologiset prosessit saattavat vilkastua tuhkalannoituksen seurauksena (Jokinen ym. 2006), ja tällä voi olla vaikutusta typen vapautumiseen orgaanisesta aineesta epäorgaanisiksi muodoiksi, jotka ovat kasveille hyvin käyttökelpoisia. Saarsalmen ym. (2014) mukaan tuhkalannoituksen vaikutus typen mineralisaatioon ei kuitenkaan ole kovin selvä. Adamczyk ym. (2016) puolestaan raportoivat, että tuhkalannoitus voi vilkastuttaa typen kiertoa ja mahdollistaa nitrifikaation, missä maaperän mikrobit muuttavat ammoniumtyypeä nitraattitypeksi.

Typen kierron sisäinen mahdollinen vilkastuminen on hyvä asia puuston ja muun kasvillisuuden ravinteiden saatavuuden kannalta, mutta nitraatin muodostuksen käynnistyminen voi myös aiheuttaa teoriassa nitraattianionin huuhtoutumista pohjaveteen. Anionimuotoinen nitraatti ei sitoudu maaperään kovin hyvin ja se on veden mukana hyvin liikkuva aine.

Edellä käsitelty tyypilannoitus lisää puuston kasvua, koska tyypestä on luontaisesti pulaa suomalaisissa metsäekosysteemeissä. Tuhkalannoituksen on sen sijaan havaittu lisäävän tyypilannoituksen tehoa, sillä yhteislannoitus on tuottanut suuremman puuston tilavuuskasvun kuin pelkkä tyypilannoitus (Saarsalmi ym. 2006). Sen sijaan tuhkalannoituksen yksinään ei ole havaittu useinkaan lisäävän puuston kasvua tai vaikutus on ollut vain lievä tyypirajoitteisilla kangasmailla (Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2004, 2005). Viljavilla kangasmailla on tosin havaittu myös puuston kasvua (Jacobson 2003).

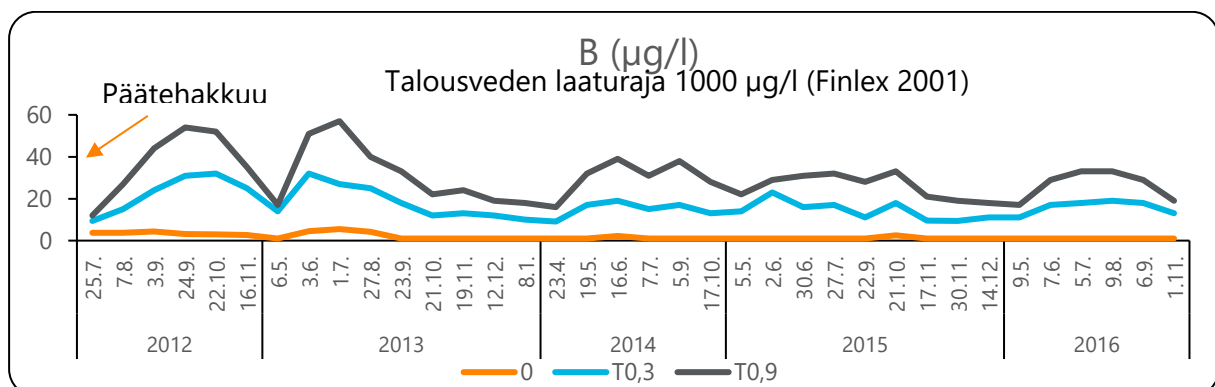
Tuhkalannoituksen määräksi kerta-annoksena on suositeltu enintään 5000 kg hehtaarille kangasmaille (Huotari 2012). Tuhkalannoituksen suurempia annoksia rajoittaa mm. tuhkan mahdollisesti sisältämät raskasmetallit, joiden vuoksi tuhkan kerta-annoksia on varmuuden vuoksi rajoitettu. Tuhkalannoituksen kerta-annos perustuu mm. kadmiumin mahdollisiin määriin tuhkassa (Mälkönen 2003). Viime vuosina on pohdittu raskasmetallien osalta hyvälaatuisten tuhkien kyseessä ollessa, josko tuhkaa voisi käyttää suosituksia suurempia määriä kangasmailla ja mitä etuja tai mahdollisia haittoja tästä aiheutuisi.

Kangasmailla tuhkalannoituksen merkitys perustuu maaperän ravinteisuuden ja kemiallisen tilan tukemiseen eikä niinkään suoraan puuston kasvun lisäämiseen. Sen sijaan ojitetuissa suometsissä tuhkalannoitus käynnistää selvän ja pitkäaikaisen puuston kasvun (Silfverberg & Huikari 1985, Moilanen ym. 2005). Puuston kasvureaktio on voimakkaampi soilla, joissa turpeessa on runsaasti tyypeä (Moilanen & Issakainen 2000, Moilanen ym. 2005, Huotari 2012).

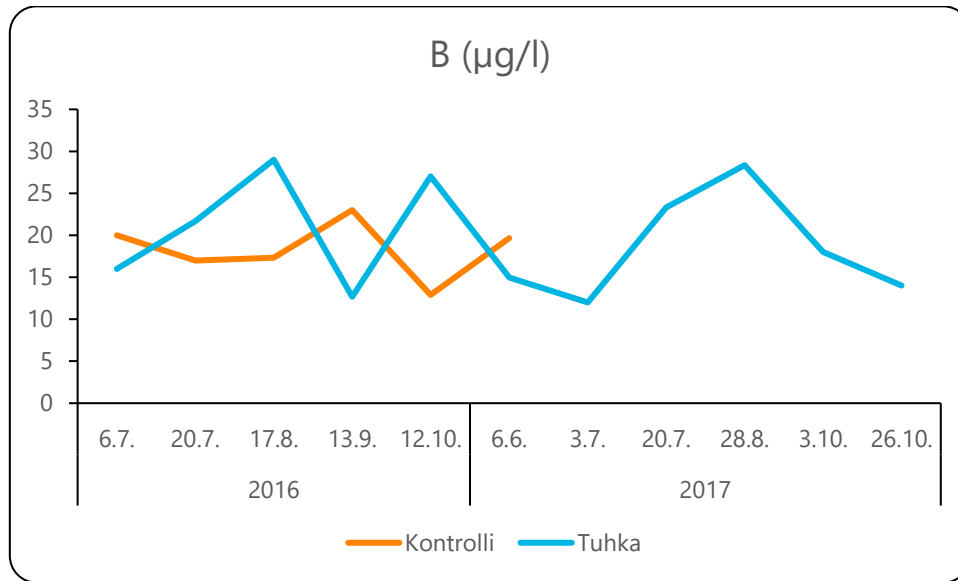
2.2. Tuhkalannoitus ja boori

Lannoitteena käytettävässä tuhkassa on yleensä booria, mutta metsissä käytettävään tuhkalannoitukseen sitä voidaan myös lisätä (Huotari 2012). Puuntuhka on varsin soveltuva lannoite myös kasveille käyttökelpoisen boorin lisäämiseen (Saarsalmi ym. 2005), ja puuntuhkalannoitus voi, riippuen tuhkan koostumuksesta ja metsämaan luontaisesta booripitoisuudesta, lisätä metsämaan veden booripitoisuuksia merkittävästi (Kuva 5 ja 6). Tuhkan sisältämä boori on kalliumin tapaan hyvin veteen liukeneva (Nieminen ym. 2005). Boorin voimakas liukeneminen puu- ja turvepohjaisesta tuhkasta maa-aineksen läpi valuvaan sadeveteen on myös osoitettu kokeissa, joissa tuhkaa on lisätty metsäteihin hiekan ja soran sekaan tien kantavuutta lisäämään (Ryhti ym. 2017, Kuva 7). Metsäteissä käytetyt tuhkamäärät ovat suuria verrattuna lannoituksessa käytettyihin määriin, mutta ne heijastavat samoja liukenemisilmiöitä kuin metsämaalannoituksessa. Liukoisuustulokset, joita on saatu yhtenäisillä tuhkeroksilla ja suurilla määrillä, ovatkin varsin käyttökelpoisia selvittäessä tuhkan liukoisuusominaisuuksia. Samat liukoisuusprosessit vaikuttavat myös lannoitteista vapautuviin ravinteisiin, mutta lannoitekokeissa liukoisuusprosessien tutkiminen on monesti hankalampaa metsämaan luontaisten ravinnevirtojen vuoksi. Jos booria on lisätty tuhkalannoitukseen, lannoitteen käyttö pohjavesialueella tai suojelualueella on kielletty (Huotari 2012). Tuhkalannoitusta käytettäessä boorin huuhtoutuminen pohjaveteen tulee muutoinkin huomioida.

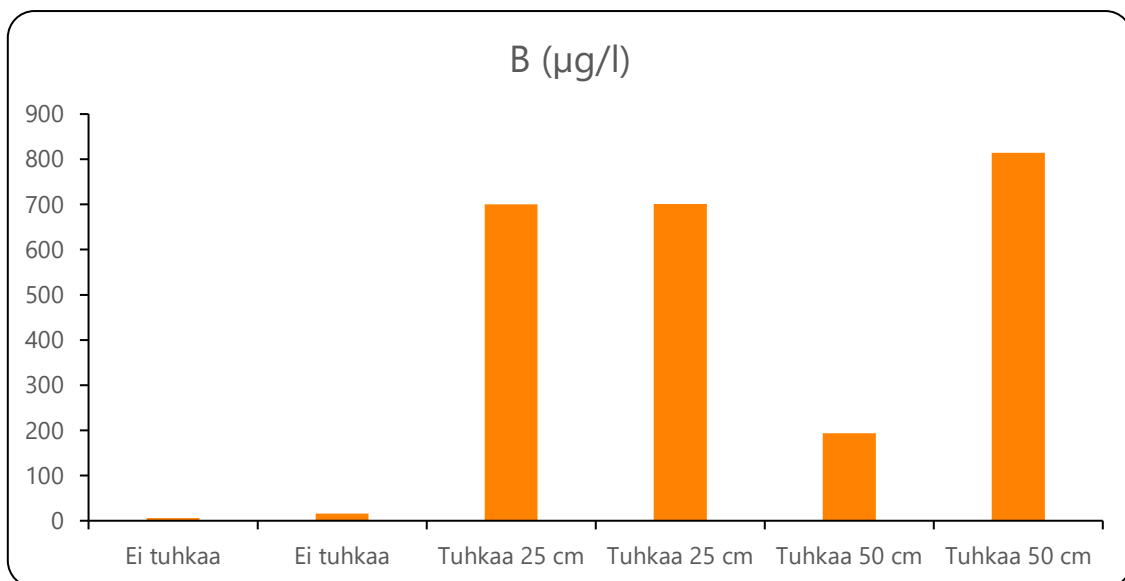
Suomessa ja myös muualla Pohjoismaissa esiintyy havupuumetsiköissä paikoin boorin niukuutta. Boorin esiintyminen maaperässä ja kallioperässä sekä niiden geokemiallista koostumusta heijastavassa pohjavedessä on alueellisesti Suomessa jakautunut siten, että korkeimmat pohjaveden booripitoisuudet esiintyvät Lounais-Suomessa ja länsirannikolla (Lahermo ym. 2002). Boorin esiintymistä pohjavedessä säätelevät mineraalien rapautuminen ja savisedimenteistä tapahtuva huuhtoutuminen. Boorin esiintyminen mineraaleissa ja kivilajeissa sekä sedimenteissä heijastaa mereistä alkuperää. Erityisen tärkeää on myös merestä ilmaitse kulkeutuva boori ja sen laskeuma sadeveden mukana (Lahermo ym. 2002). Kuusen ja männyn neulasten booripitoisuuksien onkin raportoitu olevan korkeimmillaan lähellä rannikkoalueita Suomessa, ja pitoisuudet laskevat sisämaahan päin johtuen merestä laskeuman mukana tulevasta boorista (Merilä 2007). Tuhkalannoituksen on raportoitu kohottavan neulasten booripitoisuuksia (Jacobson 2003, Saarsalmi ym. 2004, Saarsalmi ym. 2005). Näin ollen tuhkan käyttö lannoitteena sopii kangasmetsiin, joissa esiintyy boorin puutosta.



Kuva 5. Esimerkki tuhkalannoituksen booripitoisuuksia lisäävästä vaikutuksesta metsämaan vajovedessä (syvyys 40 cm maan pinnasta). Kohde on Lapinjärvellä sijaitseva kuusikon lannoituskoe. Tuhka 0,9=tuhkalannoitus 0,9 kg/m² eli 9000 kg/ha. Tuhka 0,3=tuhkalannoitus 0,3 kg/m² eli 3000 kg/ha. Kontrolli=ei lannoitusta.



Kuva 6. Esimerkki tuhkalannoituksen vaikutuksesta metsämaan humuskerroksen vajoveden booripitoisuuteen. Kohde on Kivalossa Pohjois-Suomessa sijaitseva männikön lannoituskoe. Tuhkalannoitus 3000 kg/ha.

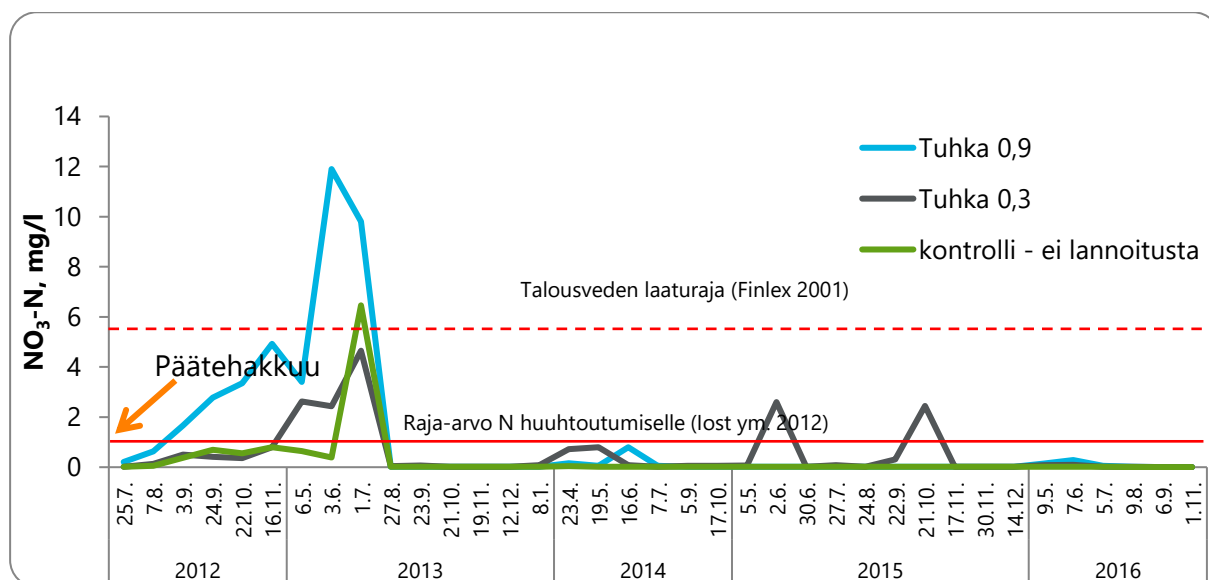


Kuva 7. Boorin liukeneminen tuhkakerroksen läpi kulkeneeseen sadeveten. Vajoveden booripitoisuus on mitattu tuhkaa sisältävässä metsätiessä, missä käsittelyinä olivat kontrolli (ei tuhkaa), 25 cm kerros tuhkaa, 50 cm kerros tuhkaa. Metsätien hiekasta ja sorasta ei booria juurikaan liukene. Käytetty tuhka oli puu- ja turvepohjaista lentotuhkaa, ja sitä tutkittiin metsätiessä kantavuutta parantavana kerroksena. Tuhkamäärä metsätiessä on suuri verrattuna lannoitteeseen, mutta muutoin liukenemisprosessi on periaatetasolla samanlainen kuin lannoitetuhkasta. Tulokset ovat raportista Ryhti ym. (2017).

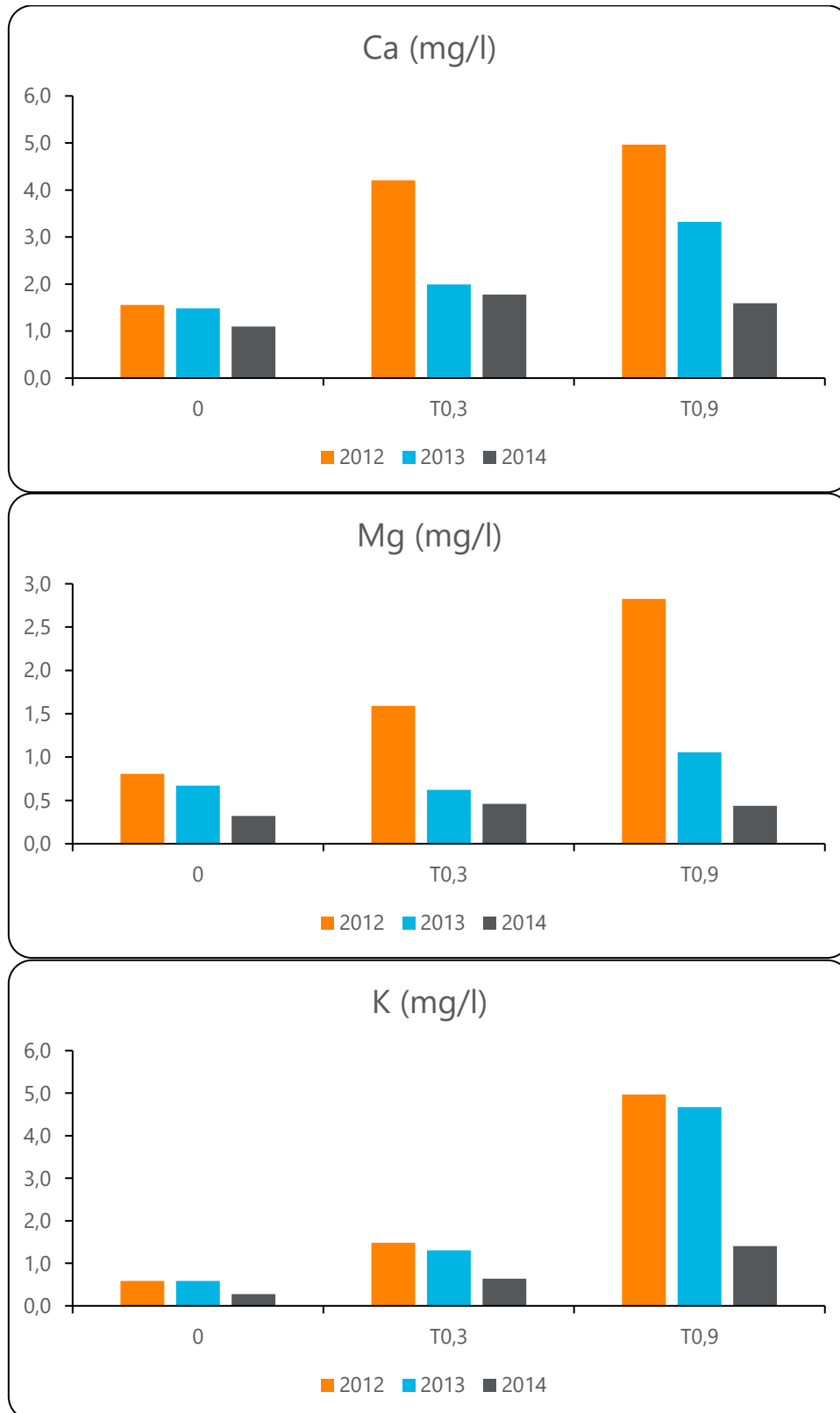
2.3. Uusimpia tuloksia tuhkalannoituksen vaikutuksesta typen kiertoon

Lapinjärven lannoituskokeella tutkittiin normaalin (3000 kg/ha) ja nykyisiä suosituksia ylittävän (9000 kg/ha) tuhkalannoituksen vaikutuksia ravinnekiertoon liittyen kokopuunkorjuuseen ja sen aiheuttaman ravinnepoistuman korvaamiseen hakkuun jälkeen tuhkalannoituksella. Tutkimusalue oli mustikkatyyppin kuusikko, joka kasvoi moreenimaalla.

Suuri tuhkalannoitusmäärä (9000 kg/ha) vilkastutti selvästi typen kiertoa maaperässä verrattuna tavanomaiseen lannoitukseen (3000 kg/ha). Tämä näkyi nitraatin pitoisuuksien kohoamisena metsämaan vajovedessä verrattuna alempaan tuhkamäärään tai lannoittamattomaan kontrolliin (Kuva 8). Pitoisuuksien nousu lannoituksien ja hakkuun seurauksena oli melko lyhytaikainen ilmiö pohjavesihuhtoutumien näkökulmasta. Tavanomainen tuhkalannoitusmäärä ei heijastunut kohonneina tyyppipitoisuuksina, vaan pitoisuudet olivat samanlaisia kuin lannoittamattomalla alalla.



Kuva 8. Vajoveden nitraattityppipitoisuus Lapinjärvellä sijaitsevalla kuusikon päättehakkuukohteella syvyydellä 40 cm maan pinnasta. Tuhka 0,9=tuhkalannoitus 0,9 kg/m² eli 9000 kg/ha. Tuhka 0,3=tuhkalannoitus 0,3 kg/m² eli 3000 kg/ha. Kontrolli=e-i lannoitusta.



Kuva 9. Vajoveden Ca-, Mg- ja K-pitoisuus Lapinjärvellä sijaitsevalla kuusikon päätehakuukohteella syvyydellä 40 cm maan pinnasta. Tuhkalannoitus on annettu päätehakuun ja hakkuutähteiden korjuun jälkeen korvaamaan emäsravinettä. T0,9=tuhkalannoitus 0,9 kg/m² eli 9000 kg/ha. T0,3=tuhkalannoitus 0,3 kg/m² eli 3000 kg/ha. Kontrolli=ei lannoitusta.

2.4. Tuhkalannoituksen merkitys emäsravinnetaseen parantajana ja ylläpitäjänä kangasmailla – esimerkki ravinnetaseesta eteläsuomalaisessa kuusikossa

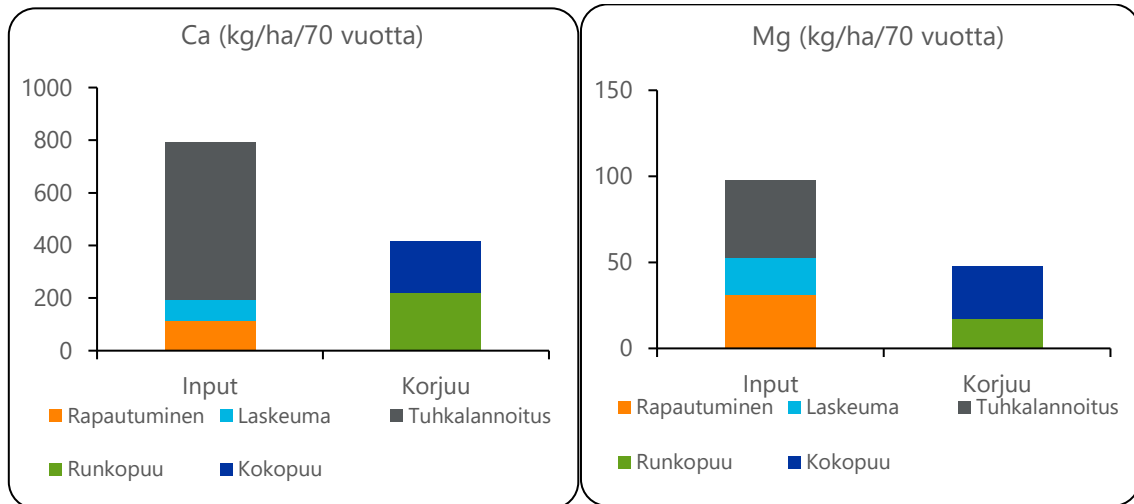
Puun tuhkasta valmistetulla lannoitteella pyritään lisäämään kangasmailla mm. emäsravinteita (Ca, Mg, K). Tuhkalannoituksella voidaan korvata esimerkiksi puun korjuussa tapahtuvaa emäsravinteiden menetystä (kuva 9). Emäsravinteet ovat perusravinteita kasvillisuudelle, mutta niiden merkitys kangasmailla on erityisesti myös maaperän riittävän puskurikyvyn ylläpitäjänä. Maaperää pyrkivät happamoittamaan monet luontaiset tekijät kuten puiden ravinteiden otto, orgaanisen aineen hajoamisessa syntyvät heikot hapot ja veteen luontaisesti liukeneva ilman hiilidioksidi. Myös typpilaskeuma ja nykyään jo vähentynyt rikkilaskeuma voivat lisätä happamoitumista (van Breemen ym. 1983, 1984). Maaperän luontainen maannoskehitys, joka suomalaisissa oloissa on yleensä podsolisaatio, kuluttaa maaperän emäsravinnevaroja ja lisää maan happamuutta (Mälkönen & Tamminen 2003).

Puskurikyvyn säilyminen on tärkeää siksi, että se säätelee maan pH:n pysymistä vakaana ja riittävän korkealla tasolla. Tällä on myös tärkeä välillinen merkitys puiden ravinteiden saannille, sillä happamuustila vaikuttaa typen kierron prosesseihin. Tuhka vilkastuttaa maaperän mikrobin hajotustoimintaa, ja tällä voi olla vaikutusta typen saatavuudelle.

Koska puiden oksat ja neulaset sisältävät runsaasti ravinteita, emäsravinteiden poistuma puuaineksen mukana kasvaa merkittävästi, jos puu korjataan kokopuuna tai jos hakkuutähteet korjataan (Kuva 10). Metsäekosysteemistä poistuu luontaisesti emäsravinteita myös vajoveden mukana. Metsäekosysteemin ravinnekierrossa ainoat emäsravinnelähteet, jotka tuovat kasvillisuuden käyttöön uusia ei-kierrätettyjä ravinteita, ovat ilmakehästä tapahtuva hiukkasmainen kuivalaskeuma ja sateen mukana maahan tuleva märkälaskeuma sekä mineraalien rapautuminen, joka vapauttaa emäsravinteita mineraalirakenteista maahan kasveille käyttökelpoiseen muotoon.

Kuvassa 10 on esitetty eteläsuomalaisille kuusikoille kalsiumin ja magnesiumin taseet ottaen huomioon syötteinä laskeuman ja mineraalien rapautumisen kautta tulevat ainemäärät. Tuhkalannoitus (3000 kg/ha rakeistettua puun tuhkaa) on myös tärkeä ravinteiden syöte, vaikka kaikki ravinteet eivät olekaan tuhkassa heti kasvillisuuden käytettävissä toisin kuin laskeuman ja rapautumisen kautta tulevat ravinteet. Kalsiumin on kuitenkin oletettu vapautuvan melko hyvin tuhkasta. Kalsiumin ja magnesiumin osalta tuhkan mukana tulevat ainemäärät ovat varsin vertailukelpoisia kaikissa puun osissa yhteensä oleviin ravinnemääriin nähden (tämä vastaa teoreettista kokopuun korjuuta). Puustoon sitoutuneet ravinnemäärät on laskettu noin 70-vuotiaasta puustosta ja syötteet vastaavasti tälle samalle ajanjaksolle.

Kaikki tuhkalannoituksen emäsravinteet eivät suinkaan sitoudu kasvillisuuteen, vaan osa jää maaperään lisäämään ja tukemaan emäsravinnevarastoja. Osa emäsravinteista kulkeutuu pois myös vajoveden mukana. Edellä kuvattu ainetaselaskelma kuitenkin osoittaa, että tuhkalannoituksella voidaan lisätä merkittäviä emäsravinneväriä maaperään verrattuna muihin ravinnesyötteisiin, ja tällä on merkitystä maaperän happamuuden vähentämisen ja puskurikyvyn säilymisen kannalta. Tuhkalannoituksessa metsämaahan tulevat emäsravinneväriä ovat myös merkittäviä verrattuna puustoon sitoutuneisiin ravinnevarastoihin nähden.



Kuva 10. Eteläsuomalaisille kuusikoiden tuhkalannoituskokeille laskettu kalsiumin ja magnesiumin syöte (Input) tuhkalannoituksen mukana verrattuna muihin syötteisiin (laskeuma, rapautuminen). Vertailuna on myös noin 70 vuotiaan kuusikon puuston eri osiin sitoutuneet ravinnemäärät (Ukonmaanaho ym. 2008).

2.5. Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan veden raskasmetallipitoisuuksiin – uusia tuloksia pohjoissuomalaisesta männiköstä

Puun palaessa tuhkaksi puuaineksessa olevat raskasmetallit voivat rikastua tuhkaan. Tuhkalannoituksen sisältämää kadmiumia (Cd) on pidetty potentiaalisesti haitallisena metsäekosysteemin ravinnekierrossa, sillä se on toksinen kohonneina pitoisuuksina. Perkiömäki (2004) ja Perkiömäki ym. (2003a) tutkivat tuhkalannoituksen sisältämän kadmiumin vaikutusta humuskerroksen mikroflooraan kangasmailla. Tuhkalannoituksen Cd ei muuttunut heidän tutkimuskohteillaan biosaatavaksi tai haitalliseksi maaperän mikrobeille. Kadmiumin ei myöskään havaittu huuhtoutuvan merkittävästi metsämaan maaveden mukana. Tavanomaisen lannoitusmäärän ollessa kyseessä myöskään sienien ja marjojen Cd-pitoisuuden ei havaittu kohonneen. Kadmiumin osalta tuhkalannoitus näyttikin olevan turvallinen käyttää kangasmailla, mutta Perkiömäki ym. (2003b) suosittelivat saman kohteen lannoitusta vain kerran kiertoajassa.

Raskasmetallipitoisuudet voivat vaihdella tuhkassa, ja sen vuoksi vain hyvälaatuista metsälannoitukseen sopivaa tuhkaa voidaan käyttää lannoitteena. Tuhkalannoituksen osalta on edelleenkin ollut tarvetta lisätutkimuksiin liittyen tuhkan mahdollisesti sisältämien raskasmetallien liukenemiseen ja liikkumiseen maaperän veden mukana. Pohjois-Suomessa Kivalossa toteutettiin tuhkalannoituskoe tavanomaisella suositusta noudattavalla tuhkamäärällä (rakeistettua puuntuhkaa 3000 kg/ha). Tarkoituksena oli saada kattava aikasarja-aineisto raskasmetallien liukenemisesta tuhkasta maaperän vajoveteen. Tutkimuskohde oli kuivan kankaan lajittuneen hiekkamaaperän männikkö, ja vajovettä kerättiin lysimetreillä humuskerroksen alapuolelta ja kivinäismaasta 40 cm:n syvyydeltä.

Mitattujen raskasmetallien pitoisuudet on esitetty kuvassa 11. Tuhkalannoitus ei yleisesti ottaen kohottanut raskasmetallipitoisuuksia verrattuna lannoittamattomaan kontrollialaan. Ainoastaan mangaanin osalta tuhkalannoitus lisäsi humuskerroksen alaisen vajoveden pitoisuutta, mutta veden vajotessa syvemmälle maahan pitoisuudet alenivat hyvin mataliksi. Mangaani on tärkeä ravinnehivenaine, eikä sen pitoisuuksien nousu ollut haitallista. Minkään raskasmetallin

osalta ei huuhtoutumista tapahtunut merkittäviä määriä juuristokerroksen alapuolelle ja edelleen pohjaveteen.

Raskasmetallien pitoisuus maavedessä voi lisääntyä pH:n alentumisen myötä (esim. Lindroos ym. 2007). Tuhkalannoitus sen sijaan vähentää maaperän happamuutta, mikä estää raskasmetallien liukenemistä ja liikkuvuutta (Perkiömäki ym. 2003). Metsämaan humuskerros ja kivennäismaan pintaosa sisältävät runsaasti orgaanista ainesta ja maavedessä on paljon liukoista orgaanista hiiltä (DOC) (Lindroos ym. 2008), mikä voi myös sitoa kompleksien muodostumisen kautta metalleja ja raskasmetalleja (Lindroos ym. 1995, Temminghof ym. 1998). Kiikkilä ym. (2001) raportoivat kuparin kompleksoitumisen lisääntyvän DOC-pitoisuuden nousun myötä, mikä johti maaliuoksen toksisuuden vähentymiseen maaperän bakteereille. Myös DOC-pitoisuudet voivat kohota tuhkalannoituksen seurauksena (Ludwig ym. 2000).

Myös Kivalossa tehty vajovesitutkimus tukee käsitystä, että suositusmäärien mukainen tuhkalannoitus on turvallinen metsäekosysteemin raskasmetallien kierron suhteen. Haitallisimpana pidetyn kadmiumin pitoisuudet olivat tuhkalannoitettujen alojen vajovedessä erittäin matalia ja alle talousveden laaturajan, jota tässä työssä käytettiin vertailutasona.



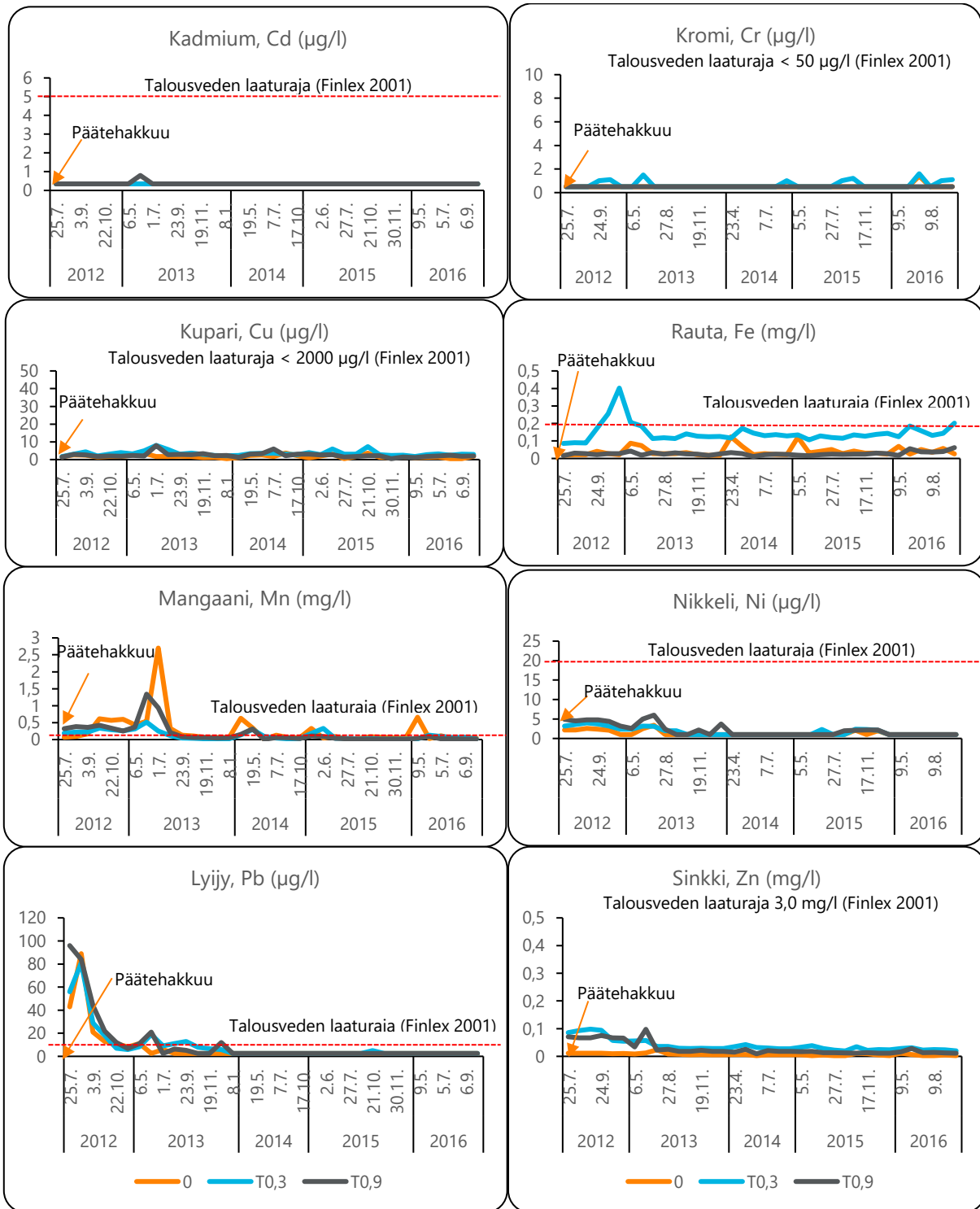
Kuva 11. Vajoveden raskasmetallipitoisuudet Kivalon männikössä humuskerroksen alla (pinta) ja kivennäismaassa syvyydellä 40 cm. Tuhka=tuhkalannoitus 3000 kg/ha. Kontrolli=ei lannoitusta.

2.6. Tuhkalannoitusmäärien kasvattamisen hyödyt ja haitat kangasmailla – uusia tuloksia eteläsuomalaiselta kuusikolta

Energiantuotannossa syntyy runsaasti puupohjaista tuhkaa, josta hyvälaatuista osaa voidaan käyttää metsälannoitteena. Bioenergian käytön lisääminen on johtanut myös tuhkamäärien kasvuun, ja tuhkalle onkin pohdittu lisäkäyttökohteita. Eräänä ajatuksena on esitetty, että voitaisiinko kangasmaiden lannoitusta lisätä ja saataisiinko siitä metsämaan ravinnetilan kannalta hyötyä.

Eteläsuomalaisella mustikkatyyppin kuusikon päätehakkuukokeella tutkittiin tuhkalannoitusmäärien kasvattamisen vaikutusta raskasmetallien huuhtoutumiseen vajoveden mukana juuristovyöhykkeen alapuolelta pohjaveteen (kuva 12). Päätehakatulle kuusikon moreenimaalle annettiin tuhkalannoitus tavanomaisena määränä (3000 kg/ha) ja kolminkertaisena määränä (9000 kg/ha). Lisäksi vertailuna oli lannoittamaton ala. Tarkoituksena oli selvittää, lisääkö tuhkamäärän lisääminen raskasmetallien huuhtoutumista vajovedessä.

Yleisenä havaintona oli, että suuri tuhkalannoitusmäärä ei lisännyt raskasmetallien huuhtoutumista merkittävästi verrattuna tavanomaiseen lannoitusmäärään tai lannoittamattomaan tilanteeseen. Ainoastaan nikkelpitoisuus oli lyhytaikaisesti heti lannoituksen jälkeen korkein suurimpaan tuhkalannoitukseen liittyen, mutta vajoveden pitoisuudet olivat selvästi talousvedelle asetetun rajan alapuolella ja alenivat edelleen suhteellisen nopeasti. Tämän lannoituskokeen perusteella rakeistetun puuntuhkan tavanomaista lannoitusmäärää voitaisiin haluttaessa nostaa aiheuttamatta lisääntyntä raskasmetallien huuhtoutumista. Tulos tukee myös käsitystä, että nykysuositusten mukainen lannoitus on turvallista huuhtoutumisen kannalta. On kuitenkin huomattava, että raskasmetalleja tulee maaperään enemmän suuremmilla tuhkalannoitusmäärillä, vaikka ne eivät huuhtoudukaan vajoveden mukana.



Kuva 12. Vajoveden mukana huuhtoutuvat raskasmetallit eteläsuomalaisella kuusikon päätehakkuukokeella. 0=kontrolli, ei tuhkalannoitusta. T0,9=tuhkalannoitus 0,9 kg/m² eli 9000 kg/ha. T0,3=tuhkalannoitus 0,3 kg/m² eli 3000 kg/ha.

3. Yhteenveto

Tämän raportin tulokset tukevat käsitystä, että typpilannoituksen mukana maahan tuleva typpi pidättyy suurelta osaltaan metsäekosysteemin puustoon, pintakasvillisuuteen ja maaperään.

Typpilannoituksen lisäksi kangasmailla voidaan käyttää myös tuhkalannoitusta, joko sellaisenaan tai yhdessä typpilannoituksen kanssa. Tuhkalannoitusta voidaan käyttää, kun halutaan palauttaa metsäekosysteemiin sieltä esimerkiksi puunkorjuussa menetettyjä ravinteita. Tuhkalannoitus voi myös vaikuttaa typen kiertoon ja pitoisuuksiin metsämaan vedessä. Tuhkalannoituksen on myös raportoitu kohottavan maaveden ja neulasten booripitoisuuksia. Näin ollen tuhkan käyttö lannoitteena sopii kangasmetsiin, joissa esiintyy boorin puutosta.

Etenkin tuhkan sisältämien raskasmetallien on pelätty aiheuttavan ongelmia. Etelä-Suomen kuusikoissa ja Pohjois-Suomen männiköissä tehdyissä kokeissa maaveden seuranta ei kuitenkaan paljastanut merkittävästi kohonneita raskasmetallipitoisuuksia verrattuna lannoittamattomaan kontrollialaan.

Viitteet

- Adamczyk, S., Kitunen, V., Lindroos, A.-J., Adamczyk, B. & Smolander, A. 2016. Soil carbon and nitrogen cycling processes and composition of terpenes five years after clear-cutting a Norway spruce stand: Effects of logging residues. *Forest Ecology and Management* 381: 318–326.
- Bergh, J.L., Linder, S., Lundmark, T. & Elfving, B. 1999. The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden. *Forest Ecology and Management* 119: 51–62.
- Dise, N.B., Rothwell, J.J., Gauci, V., van der Salm, C. & de Vries, W. 2009. Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases. *Science of the Total Environment* 407: 1798–1808.
- Eriksson, H.M. 1998. Short-term effects of granulated wood ash on forest soil chemistry in SW and NE Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 43–55.
- Eriksson, H.M., Nilsson, T. & Nordin, A. 1998. Early effects of lime and hardened and non-hardened ashes on pH and electrical conductivity of the forest floor, and relations to some ash and lime qualities. *Recycling of wood-ash: selected results from Swedish R&D programme. Scandinavian Journal of Forest Research. Suppl. 2: 56–66.*
- Finlex 2001. Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen asetukset pienten yksiköiden talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. 401/2001.
- Forsius, M., Posch, M., Holmberg, M., ym. 2021. Assessing critical load exceedances and ecosystem impacts of anthropogenic nitrogen and sulphur deposition at unmanaged forested catchments in Europe. *Science of the Total Environment* 753: 141791.
- Gundersen, P., Callesen, I. & de Vries, W. 1998. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. *Environmental Pollution* 102 (Suppl. 1): 403–407.
- Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. METLA. 47 s.
- Högberg, P., Näsholm, T., Franklin, O. & Högberg, M. 2017. Tamm Review: On the nature of the nitrogen limitation to plant growth in Fennoscandian forests. *Forest Ecology and Management* 403: 161–185.
- Iost, S., Rautio, P. & Lindroos, A.-J. 2012. Spatio-temporal trends in soil solution Bc/Al and N in relation to critical limits in European forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution* 223: 1467–1479.
- Jacobson, S. 2003. Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. *Silva Fennica* 37: 437–450.
- Jokinen, H., Kiikkilä, O. & Fritze, H. 2006. Exploring the mechanisms behind elevated microbial activity after wood ash application. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2285–2291.
- Karlton, E., Saarsalmi, A., Ingerslev, M., Mandre, M., Andersson, S., Gaitnieks, T., Ozolincius, R. & Varnagiryte-Kabasinskiene, I. 2008. Wood-ash recycling – possibilities and risks. Julkaisussa: Röser ym. (toim.). Sustainable use of forest biomass for energy: a synthesis with focus on the Baltic and Nordic region. *Managing Forest Ecosystems* 12: 79–108.

- Kaunisto, S., Kukkola, M., Aarnio, J. & Saarsalmi, A. 2002. Metsän lannoitus ja ravinnehäiriöt. Tapion taskukirja. 24. uudistettu painos. Metsälehti Kustannus. ss. 196–203.
- Kiikkilä, O., Perkiömäki, J., Barnette, M., Derome, J., Pennanen, T., Tulisalo, E. & Fritze, H. 2001. In situ bioremediation through mulching of soil polluted by a copper-nickel smelter. *Journal of Environmental Quality* 30: 1134–1143.
- Lahermo, P., Tarvainen, T., Hatakka, T., Backman, B., Juntunen, R., Kortelainen, N., Lakomaa, T., Nikkarinen, M., Vesterbacka, P., Väisänen, U. & Suomela, P. 2002. Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaaliskemiallinen laatu vuonna 1999. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. Tutkimusraportti 155. 92 s.
- Linder, S. 1987. Responses to water and nutrition in coniferous ecosystems. Julkaisussa: Schultze, E.D. & Zwöjfer, H. (toim.). Potentials and limitations of ecosystem analysis. *Ecol. Stud* Berlin: Springer. p. 180–202.
- Lindroos, A.-J., Derome, J. & Niska, K. 1995. The relationship between dissolved organic matter and percolation water chemistry in Northern Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 79: 191–200.
- Lindroos, A.-J., Derome, J., Raitio, H. & Rautio, P. 2007. Heavy metal concentrations in soil solution, soil and needles in a Norway spruce stand on an acid sulphate forest soil. *Water, Air and Soil Pollution* 180: 155–170.
- Lindroos, A.-J., Derome, J., Mustajärvi, K., Nöjd, P., Beuker, E. & Helmisaari, H.-S. 2008. Fluxes of dissolved organic carbon in stand throughfall and percolation water in 12 boreal coniferous stands on mineral soils in Finland. *Boreal Environment Research* 13 (Suppl. B): 22–34.
- Lindroos, A.-J., Tamminen, P., Heikkinen, J. & Ilvesniemi, H. 2016. Effect of clear-cutting and the amount of logging residue on chemical composition of percolation water in spruce stands on glaciofluvial sandy soils in southern Finland. *Boreal Environment Research* 21: 134–148.
- Ludwig, B., Heil, B., Flessa, H. & Beese, F. 2000. Use of ¹³C and ¹⁵N mass spectrometry to study decomposition of *Calamagrostis epigeios* in soil column experiments with and without ash additions. *Isotopes in Environmental Health Studies* 36: 49–61.
- Melin, J. & Nömmik, H. 1988. Fertilizer nitrogen distribution in a *Pinus Sylvestris* / *Picea abies* ecosystem, Central Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 3: 3–15.
- Merilä, P. 2007. Needle chemistry on the intensive monitoring plots 1995–2003. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 45: 46–62.
- Merilä, P., Mustajärvi, K., Helmisaari, H.-S., Hilli, S., Lindroos, A.-J., Nieminen, T.M., Nöjd, P., Rautio, P., Salemaa, M. & Ukonmaanaho, L. 2014. Above- and below-ground N stocks in coniferous boreal forests in Finland: Implications for sustainability of more intensive biomass utilization. *Forest Ecology and Management* 311: 17–28.
- Moilanen, M. & Issakainen, J. 2000. Tuhkalannoituksen metsävaikutukset. Metsätehon raportti 93. 38 s.
- Moilanen, M., Silfverberg, K., Hökkä, H. & Issakainen, J. 2005. Wood ash as a fertilizer on drained mires – growth and foliar nutrients of Scots pine. *Canadian Journal of Forest Research* 35(11): 2734–2742.

- Mustajärvi, K., Merilä, P., Derome, J., Lindroos, A.-J., Helmisaari, H.-S., Nöjd, P. & Ukonmaanaho, L. 2008. Fluxes of dissolved organic and inorganic nitrogen in relation to stand characteristics and latitude in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Boreal Environment Research* 13(Suppl. B): 3–21.
- Mälkönen, E. 1982. Kangasmetsien lannoitus. Julkaisussa: Operaatio metsälannoitus 20 v. – Entä tästä eteenpäin. ss. 7–13.
- Mälkönen, E., Derome, J. & Kukkola, M. 1990. Effects of nitrogen inputs on forest ecosystems. Estimation based on long-term fertilization experiments. In: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (eds.). *Acidification in Finland*. Springer-Verlag. Berlin – Heidelberg. pp. 325–347.
- Mälkönen, E. 2003. Metsämaan ravinteisuuden hoito. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos. Metsälehti Kustannus. ss. 175–197.
- Mälkönen, E. & Tamminen, P. 2003. Maannostuminen ja maannosten kuvaus. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). *Metsämaa ja sen hoito*. Metsäntutkimuslaitos. Metsälehti Kustannus. ss. 129–140.
- Nieminen, M., Piirainen, S. & Moilanen, M. 2005. Release of mineral nutrients and heavy metals from wood and peat ash fertilizers: field studies in Finnish forest soils. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 146–153.
- Nilsen, P. 2001. Fertilization experiments on mineral soils. A review of the Norwegian results. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(6): 541–554.
- Nohrstedt, H.-Ö., Arnebrandt, K., Bååth, E. & Söderström, B. 1989. Changes in carbon content, respiration rate, ATP content and microbial biomass in nitrogen-fertilized pine forest soils in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 323–328.
- Nohrstedt, H.-Ö., Ring, E., Klemedsson, L. & Nilsson, Å. 1994. Nitrogen losses and soil water acidity after clear-felling of fertilized experimental plots in a *Pinus Sylvestris* stand. *Forest Ecology and Management* 66: 69–86.
- Nohrstedt, H.-Ö. 2001. Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: a review of Swedish experiences. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(6): 555–573.
- Nöjd, P., Lindroos, A.-J., Smolander, A., Derome, J., Lumme, I. & Helmisaari, H.-S. 2009. Artificial recharge of groundwater through sprinkling infiltration: Impacts on forest soil and the nutrient status and growth of Scots pine. *Science of the Total Environment* 407: 3365–3371.
- Nömmik, H. & Larsson, K. 1989. Assessment of fertilizer nitrogen accumulation in *Pinus sylvestris* trees and retention in soil by ¹⁵N recovery technique. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4: 427–442.
- Paavolainen, L., Fox, M. & Smolander, A. 2000a. Nitrification and denitrification in forest soil subjected to sprinkling infiltration. *Soil Biol. Biochem.* 32: 669–678.
- Paavolainen, L., Smolander, A., Lindroos, A.-J., Derome, J. & Helmisaari, H.-S. 2000b. Nitrogen transformations and losses in forest soil subjected to sprinkling infiltration. *Journal of Environmental Quality* 29: 1069–1074.

- Perkiömäki, J., Kiikkilä, O., Moilanen, M., Issakainen, J., Tervahauta, A. & Fritze, H. 2003a. Cadmium-containing wood ash in a pine forest: effects on humus microflora and cadmium concentrations in mushrooms, berries, and needles. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 2443–2451.
- Perkiömäki, J., Tom-Petersen, A., Nybroe, O. & Fritze, H. 2003b. Boreal forest microbial community after long-term field exposure to acid and metal pollution and its potential remediation by using wood ash. *Soil Biology & Biochemistry* 35: 1517–1526.
- Perkiömäki, J. 2004. Wood ash use in coniferous forests – a soil microbiological study into the potential risk of cadmium release. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 917.
- Rautio, P., Ervasti, S., Lindroos, A.-J., Hökkä, H. & Hannukkala, A. Biotuhka – Biotuhkapohjaisten materiaalien hyödyntäminen metsämaiden lannoitteina. BIOTUHKA-hankkeen (EAKR A70101) loppuraportti. Luonnonvarakeskus, Rovaniemi. (käsikirjoitus)
- Ring, E. 1995. Nitrogen leaching before and after clear-felling of fertilised experimental plots in a *Pinus sylvestris* stand in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 72(2–3): 151–166.
- Ryhti, K., Lindroos, A.-J., Kaakkurivaara, T., Ilvesniemi, H., Uusitalo, J. & Helmisaari, H.-S. 2017. Jämsän metsätiekokeissa käytettävän seostuhkan sisältämien aineiden huuhtoutuminen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 26/2017. 38 s.
- Saarsalmi, A. & Mälkönen, E. 2001. Forest fertilization research in Finland: a literature review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16: 514–535.
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E. & Piirainen, S. 2001. Effects of wood ash fertilization on forest soil chemical properties. *Silva Fennica* 35(3): 355–368.
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E. & Kukkola, M. 2004. Effects of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 217–233.
- Saarsalmi, A., Derome, J. & Levula, T. 2005. Effect of wood ash fertilization on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. *Metsäanduslikud uurimused/Forest. Studies* 42: 13–33.
- Saarsalmi, A., Kukkola, M., Moilanen, M. & Arola, M. 2006. Long-term effects of ash and N fertilization on stand growth, tree nutrient status and soil chemistry in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management* 235: 116–128.
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M. & Kukkola, M. 2014. Wood ash in boreal, low-productive pine stands on upland and peatland sites: Long-term effects on stand growth and soil properties. *Forest Ecology and Management* 327: 86–95.
- Schöpp, W., Posch, M., Mylona, S. & Johansson, M. 2003. Long-term development of acid deposition (1880–2030) in sensitive freshwater regions in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 7(4): 436–446.
- Silfverberg, K. & Huikari, O. 1985. Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaidella. *Folia Forestalia* 633. 25 s.

- Smolander, A., Kurka, A., Kitunen, V. & Mälkönen, E. 1994. Microbial biomass C and N, and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N- and P-fertilized Norway spruce stands. *Soil Biol. Biochem.* 26: 957–962.
- Smolander, A., Kitunen, V., Priha, O. & Mälkönen, E. 1995. Nitrogen transformations in limed and nitrogen fertilized soil in Norway spruce stands. *Plant & Soil* 172: 107–115.
- Smolander, A., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1998. Metsäekosysteemin toiminta typpikuormituksen alaisena. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.). Ympäristömuutos ja metsien kunto – Metsien terveydentilan tutkimusohjelman loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 691: 175–182.
- Smolander, A., Kukkola, M., Helmisaari, H.-S., Mäkipää, R. & Mälkönen, E. 2000. Functioning of forest ecosystems under nitrogen loading. Julkaisussa: Mälkönen, E. (ed.). *Forest Condition in a Changing Environment – The Finnish Case*, Kluwer Academic Publishers, pp. 229–247.
- Smolander, A., Paavolainen, L. & Mälkönen, E. 2001. C and N transformations in forest soil after mounding for regeneration. *Forest Ecology and Management* 134: 17–28.
- Temminghoff, E.J.M., van der Zee, S.E.A.T.M. & de Haan, F.A.M. 1998. Effects of dissolved organic matter on the mobility of copper in contaminated sandy soil. *European Journal of Soil Science* 49: 617–628.
- Tupek, B., Launiainen, S., Peltoniemi, M., Sievänen, R., Perttunen, J., Kulmala, L., Penttilä, T., Lindroos, A.-J., Hashimoto, S. & Lehtonen, A. 2019. Evaluating CENTURY and Yasso soil carbon models for CO₂ emissions and organic carbon stocks of boreal forest soil with Bayesian multi-model inference. *European Journal of Soil Science*: 1–12.
- Ukonmaanaho, L., Merilä, P., Nöjd, P. & Nieminen, T.M. 2008. Litterfall production and nutrient return to the forest floor in Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Boreal Environment Research* 13 (Suppl. B): 67–91.
- Waldner, P., Marchetto, A., Thimonier, A., ym. 2014. Detection of temporal trends in atmospheric deposition of inorganic nitrogen and sulphate to forests in Europe. *Atmospheric Environment* 95: 363–374.
- van Breemen, N., Mulder, J. & Driscoll, C.T. 1983. Acidification and alkalinization of soils. *Plant & Soil* 75: 283–308.
- van Breemen, N., Driscoll, C.T. & Mulder, J. 1984. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters. *Nature* 307: 599–604.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000