

Tuhkalannoituksen metsä- vaikutukset

**Mikko Moilanen
Jorma Issakainen**

**Metsätehon raportti 93
30.5.2000**

Tuhkalannoituksen metsävaikutukset

Mikko Moilanen
Jorma Issakainen

Metsätehon raportti 93
30.5.2000

Konsortiohanke: Fortum Power and Heat Oy, Metsähallitus, Metsäliitto
Osuuskunta, Metsäteollisuus ry,
Pölkky Oy, Stora Enso Oyj, UPM Kymmene Oyj,
Vapo Timber Oy

Kirjoittajien yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos
Muhoksen tutkimusasema
Kirkkosaarentie 7, 91500 Muhos
Puhelin (08) 531 2200

Asiasanat: tuhka, lannoitus, kadmium, raskasmetallit

© Metsäteho Oy

Helsinki 2000

SISÄLLYS

ALKUSANAT	3
TIIVISTELMÄ	4
1 TAUSTA JA TAVOITTEET.....	6
2 AINEISTO JA MENETELMÄT.....	7
2.1 Uudet maastokokeet.....	7
2.2 Vanhat maastokokeet.....	9
2.3 Aineiston keruu ja analysointi.....	10
3 TULOKSET	12
3.1 Maaperävaikutukset	12
3.1.1 Uudet kokeet	12
3.1.2 Vanhat kokeet	15
3.2 Marjojen alkuainepitoisuudet.....	17
3.2.1 Uudet kokeet	17
3.2.2 Vanhat kokeet	20
3.3 Sienten alkuainepitoisuudet.....	21
3.3.1 Uudet kokeet	21
3.3.2 Vanhat kokeet	23
3.4 Pintakasvillisuuden muutokset.....	25
3.5 Puuston neulasreaktiot	25
3.5.1 Uudet kokeet	25
3.5.2 Vanhat kokeet	26
3.6 Puuston kasvureaktiot.....	29
3.6.1 Uudet kokeet	29
3.6.2 Vanhat kokeet	29
4 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	34
KIRJALLISUUTTA	37
LIITTEET	

ALKUSANAT

Metsäteollisuusyritykset pyysivät 1995 Metsätehoa selvittämään sitä, mitä tutkimuksia ja kehittämistoimia pitäisi tehdä, jotta luotaisiin edellytykset suurien voimalaitosten tuottaman, etupäässä puuperäisen, tuhkan laajamittaiselle metsäkäytölle. Selvitystyön johdosta käynnistettiin vuoden 1996 lopulla Metsätehon koordinoimana Biotuhkan hyödyntäminen metsänparannusaineena -hanke. Hankkeessa tutkittiin erityisesti tuhkan metsäkäytön ympäristövaikutuksia, kuten ravinteiden huuhtoutumista ja vaikutusta vesiin, tuhkan vaikutusta marjojen ja sienien raskasmetallipitoisuuksiin sekä maaperän mikro-organismeihin. Teknistaloudellisten tutkimusten ja kokeilujen tehtävänä puolestaan oli tuottaa tietoa mm. tuhkan esikäsittelystä ja hyödyntämisen tekniikoista ja taloudesta.

Tuhkahanke päättyi vuoden 1999 lopussa. Hankkeen rahoittivat Fortum Power and Heat Oy, Metsäliitto Osuuskunta, Metsähallitus, Metsäteollisuus ry, Pölkky Oy, Stora Enso Oyj, UPM Kymmene Oyj, Vapo Timber Oy ja TEKES. Hankkeessa tutkimuksia suorittaneet organisaatiot olivat Helsingin yliopisto, Kuopion yliopisto, Oulun yliopisto, Metsäntutkimuslaitos, Metsäteho Oy sekä Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.

Tässä raportissa esitetään Metsäntutkimuslaitoksen Muhoksen tutkimusasemalla tehdyt tuhkalannoituksen metsävaikutustutkimukset. Vastuututkijana oli varttunut tutkija, MH Mikko Moilanen.

Helsinki 22.3.2000

Antti Korpilahti
tuhkahankkeen koordinaattori

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin puu- ja turvetuhkien vaikutuksia maaperään, sienten ja marjojen alkuainepitoisuuksiin sekä puuston kehitykseen. Tuhkalannoituksen vaikutuksia tutkittiin ravinteisuudeltaan erilaisilla suo- ja kangasmetsäkasvupaikoilla. Tutkimuksessa perustettiin uusia kenttäkokeita pöly- ja eri tavoin esikäsitellyillä tuhilla sekä tutkittiin tuhkalannoituksen vaikutuksia Metlan aiemmin perustamilla kokeilla.

Tutkimushankkeen aikana perustetuilla uusilla tuhkalannoituskokeilla tutkittiin tuhkan välittömiä vaikutuksia yhden ja kahden kasvukauden kuluessa lannoituksesta. Metsäkokeet perustettiin alkukesällä 1997 Muhoksen tutkimusaseman toimialueeseen. Kokeista kaksi tuli muuttumavaiheen suo-ojitusalueelle ja kaksi kivennäismaalle. Kaikissa kohteissa puusto oli mäntyvaltaista ja edusti nuorta tai varttunutta kasvatusmetsikköä. Kokeissa käytettiin puuntuhkaa 5 ja 15 t/ha, kangasmaan kokeilla turve- ja puuntuhkaa 3 ja 9 t/ha. Turvemaan lannoituksessa 5 t/ha annos puuntuhkaa vastasi suurin piirtein kaupallisella PK-lannoksella annettavaa fosforilisäystä.

Kaikki tuhkalaadut kohottivat maaperän pintakerroksen (0 - 10 cm) pH-arvoa. Happamuuden alentuminen oli kangasmaakokeilla suurempi kuin suokokeilla. Tuhkien vaikutus näkyi useiden ravinteiden, mutta myös raskasmetallipitoisuuksien kohoamisena kasvualustan pintakerroksessa. Suokokeilla eräät helppoliukoiset ravinteet (mm. kalium) näyttivät kulkeutuneen turpeessa ainakin 20 – 30 cm:n syvyydelle. Tuhkan esikäsitelyllä ei ollut vaikutusta helppoliukoisten ravinteiden liukenemiseen, kun levityksestä oli kulunut 1 – 2 vuotta.

Marjojen fosfori-, kalium-, kalsium- ja booripitoisuudet kohosivat jo levitystä seuranneena kesänä. Suuret tuhka-annokset lisäsivät myös eräiden raskasmetallien (kromi, titaani, arseeni) pitoisuuksia marjoissa. Kadmiumpitoisuudet pysyivät ennallaan tai vähenivät. Vanhoilla tuhkakokeilla marjojen alkuainepitoisuudet olivat käsittelystä riippumatta saman suuruisia. Hillan kadmiumpitoisuus näytti tuhkaaloilla pitkällä aikavälillä hiukan alentuvan.

Tuhka kohotti lyhyellä aikavälillä sienten fosfori-, kalium-, kalsium- ja booripitoisuuksia. Joissakin tapauksissa myös sienten alumiini-, arseeni- ja kromiarvot kohosivat, samoin rautapitoisuus turvetuhkalla lannoitetuilla aloilla. Kadmiumpitoisuuksissa ei havaittu selviä muutoksia. Yhdellä suokokeella pulkkosienien määrä lisääntyi voimakkaasti, kun tuhkan levityksestä oli kulunut vuosi. Ravinnetoituuksien muutokset näkyivät sienissä useita vuosia - jopa 10 - 20 vuotta - tuhka-levityksen jälkeen. Kadmiumpitoisuudet pysyivät pitkällä aikavälillä ennallaan tai joissain tapauksissa hiukan kohosivat.

Männynneulasten kalsium-, boori-, kalium- ja fosforipitoisuudet kohosivat levitystä seuranneen puolentoista vuoden aikana. Vaikutus näkyi suokokeilla voimakkaampana kuin kangaskokeilla. Ravinneolojen parantuminen osoittautui neulasanalyysin perusteella olleen vuosikymmeniä kestävä. Runsastyyppisillä kasvupaikatyypeillä puuntuikka alkoi lisätä männyn runkopuun kasvua jo 2 - 3 vuoden kuluessa, kun taas niukkatyyppisissä kohteissa selvä reaktio alkoi ilmetä vasta 7 - 8 vuotta levityksestä. Tuhkan vaikutus oli alkuvuosina vähäisempi verrattuna esim. PK-lannokseen, mutta ajan mittaan erot tasoittuivat. Turvetuhkan vaikutus jäi selvästi puuntuikkan vaikutusta pienemmäksi. Kangasmaakokeilla puuston kasvureaktio jäi kauttaaltaan hyvin vähäiseksi.

1 TAUSTA JA TAVOITTEET

Maamme teollisuuslaitoksissa ja turvevoimaloissa syntyy vuosittain puu- ja turvetuhkaa noin 300 000 tonnia. Alkuainekoostumukseltaan tuhkat ovat hyvin vaihtelevia johtuen mm. käytetystä polttoaineesta ja -tekniikasta. Yleensä ne sisältävät runsaasti kasvinravinteita ja tarjoavat näin ollen potentiaalisia resursseja metsämaiden lannoitukseen ja maanparannukseen.

Metsien tuhkalannoitukseen on tunnettu mielenkiintoa Suomessa jo 1930-luvulta lähtien. Puuntuhkan suotuisa ja pitkäaikainen vaikutus puuston kasvuun etenkin niukkaravinteisissa ojitusaluemetsissä perustuu tuhkan monipuoliseen ja tasapainoiseen ravinnesisältöön sekä maaperän happamuutta vähentävään vaikutukseen. Tuhkalannoituksen seurauksena turpeen luontaiset ravinnevarat, varsinkin typpi, mobilisoituvat tehostuneen hajotustoiminnan seurauksena puiden käyttöön (Silfverberg 1996). Kangasmailla typen puute on yleensä puuston kasvua rajoittava tekijä, joten tuhkan vaikutus puuston kasvuun jää niillä vähäiseksi. Humuskerroksen happamuus kuitenkin alenee selvästi - suurimmillaan jopa kaksi pH-yksikköä - minkä seurauksena kasvualustan hajotustoiminta kangasmaillakin muuttuu olennaisesti.

Tuhkan levitystä suo- ja metsämaille on viime vuosina tehty, joskin levitysalat ovat vähäisiä verrattuna syntyviin tuhkamääriin. Uudistuneen jätelainsäädännön ja tiukentuvien määräysten vuoksi tuhkan hyötykäytön arviointi on jälleen tullut ajankohtaiseksi. Se merkitsee lisääntyvää tutkimustarvetta, sillä tuhkankaan maaperä- ja vesistövaikutuksia ei riittävästi tunneta. Valtaosa julkaistuista selvityksistä liittyy erilaisten tuhkien puustovaikutuksiin. Tuhkan maaperävaikutusten luonteesta ja mekanismeista tutkimustieto sen sijaan on vajavaisempi. Esimerkiksi tuhkan sisältämien raskasmetallien siirtymistä marjoihin ja sieniin ja mahdollisia haittavaikutuksia ei juuri tunneta tai tutkimustuloksia on vähän.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin erilaisten puu- ja turvetuhkien lyhyt- ja pitkäaikaisvaikutuksia

- maaperän alkuaine- ja ravinnepitoisuuksiin
- pintakasvillisuuden lajisuhteisiin
- sienten ja marjojen alkuainepitoisuuksiin
- puuston ravinnetaloutteen ja kasvuun.

Työssä tutkittiin tuhkan vaikutuksia erilaisilla suo- ja kangasmetsäkasvupaikoilla. Tutkimus ajoittui vuosille 1996 - 1999.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Uudet maastokokeet

Tutkimushankkeen aikana perustetuilla maastokokeilla oli tarkoituksena selvittää erilaisten tuhkalaatujen - pöly, itsekovetettu ja rakeistettu - välittömiä (2 - 16 kuukautta) vaikutuksia maaperän ominaisuuksiin ja kasvillisuuteen. Metsäkokeet (4 kpl) perustettiin alkukesällä 1997 Metsäntutkimuslaitoksen Muhoksen tutkimusaseman toimialueeseen Muhokselle ja sen lähiympäristöön.

Kokeista kaksi perustettiin muuttumavaiheen suo-ojitusalueelle ja kaksi kivennäismaalle (Issakainen 1999) (liite 1). "Karu suo" tarkoittaa tässä tutkimusraportissa tupasvillatason rämettä (TR) ja "viljava suo" ruohotason rämettä (RhSR). Tupasvillatason räme on viljavuudeltaan heikko ja ojituskelvottomuuden alarajalla, ruohotason räme puolestaan keskimääräistä parempi turvemaan kasvupaikka. Kangasmaakohteilla "kuiva kangas" merkitsee kanervatyypin kangasta (ECT) ja "tuore kangas" puolukka-mustikkatyypin kangasta (VMT). Kaikissa kohteissa puusto oli mäntyvaltaista ja edusti nuorta tai varttunutta kasvatusmetsikköä. Ojaverkoston kuivatusteho oli kaikilla suokohteilla vähintään tyydyttävä.

Koalojen koko oli 30 x 30 metriä eli 0,09 ha. Turvemaakokeilla puuntuhkaa käytettiin 5 ja 15 t/ha, kangasmailla turve- ja puuntuhkaa molempia 3 ja 9t/ha. Kussakin kokeessa käsittelyillä oli neljä toistoa. Koejärjestelyt toteutettiin arvotujen lohkojen periaatteita noudattaen. Kokeilla käytetyt tuhkat saatiin Metsä-Botnia Oy:n Äänekosken tehtaalta, UMP-Kymmene Oyj:n Voikkaan tehtaalta ja Fortum Oyj:n Joensuun voimalaitokselta.

Äänekosken pölytuhka. Lentotuhka, jota saatiin Metsä-Botnian Äänekosken tehtaalta. Polttoaine koostui lehtipuun (n. 65 %) ja havupuun (25 %) kuoresta. Lisäpolttoaineena käytetyn lietteen osuus oli alle 10 %. Tuhka oli väriltään vaalean ruskeaa, pölymäisen hienoa ja täysin kuivaa, ja käsiteltäessä hyvin altista tuulelle.

Itsekovetettu tuhka. Äänekosken esikäsitelty pölytuhka. Tuhka kostutettiin vedellä ns. kostutusruuvissa siilosta oton yhteydessä ja siirrettiin kuorma-autolla tehdasalueelle varastokasaan. Noin kuukauden kovettumisajan jälkeen tuhka hienonnettiin kuormaajan seula-kauhalla. Raekoko vaihteli pölystä muutaman sentin läpimittaisiin kokkareisiin. Kostuttamisen vuoksi kovetettu tuhka sisälsi vettä n. 30 %. Olemukseltaan soramainen tuhka ei juuri pölyssyt käsittelyssä.

Voikkaan pölytuhka. Lentotuhka, jota toimitettiin UPM-Kymmene Oyj:n Voikkaan tehtaalta. Polttoaineena oli ollut kuusen kuori, seassa hiukan lietettä. Tuhka oli väriltään vaalean harmaata, mutta muuten Äänekosken pölytuhkan kaltaista.

Rakeistettu tuhka. Voikkaan pölytuhkasta rakeistamalla esikäsitelty tuhka. Rakeistus tehtiin Ruotsista Svedala Ab:ltä vuokratulla rumpu-rakeistuslaitteistolla. Tuhkan kosteus oli keskimäärin 26 %. Raekoko vaihteli välillä 2 - 10 mm ja sisälsi vain vähän pölisevää ainesta.

Turvetuhka. Fortum Oyj:n Joensuun turvevoimalan lentotuhka. Polttoaineena oli ollut turvetta (n. 90 %) ja havusahanpurua (10 %), tukipolttoaineena hieman raskasta polttoöljyä. Tuhka oli täysin kuivaa ja erittäin pölyävää. Väri oli puuntuhkaa tummempaa.

Äänekosken pölytuhka sisälsi yli kaksinkertaisen määrän fosforia, kaliumia, magnesiumia, mangaania ja sinkkiä sekä neljä kertaa enemmän kalsiumia kuin Voikkaan pölytuhka (liite 2). Sen sijaan kupari-, alumiini- ja kromipitoisuudet olivat viimeksi mainitussa suuremmat. Kadmiumia oli eniten Äänekosken tuhkassa ja vähiten turvetuhkassa, jossa taas oli runsaiten rautaa sekä nikkeliä, mutta niukasti kaliumia ja booria. Tuhkien K/P-suhde oli Äänekosken pölytuhkalla 3,0, Voikkaan pölytuhkalla 3,2 ja Joensuun turvetuhkalla 0,5. Kaupallisessa Metsän PK-lannoksessa (P 9 % ja K 16 %) suhde on 1,8.

Itsekovetetussa tuhkassa kalium-, kalsium-, rauta- ja kadmiumpitoisuudet olivat lievästi vastaavaa pölytuhkaa pienemmät. Alumiinin ja etenkin kuparin määrät taas olivat hiukan suuremmat.

Rakeistetussa tuhkassa oli hiukan enemmän kaliumia, kalsiumia, magnesiumia, sinkkiä ja nikkeliä kuin vastaavassa pölytuhkassa. Sen sijaan kupari- ja kromimäärät olivat selvästi pienemmät. Muiden alkuaineiden kohdalla ei ollut merkittäviä eroja.

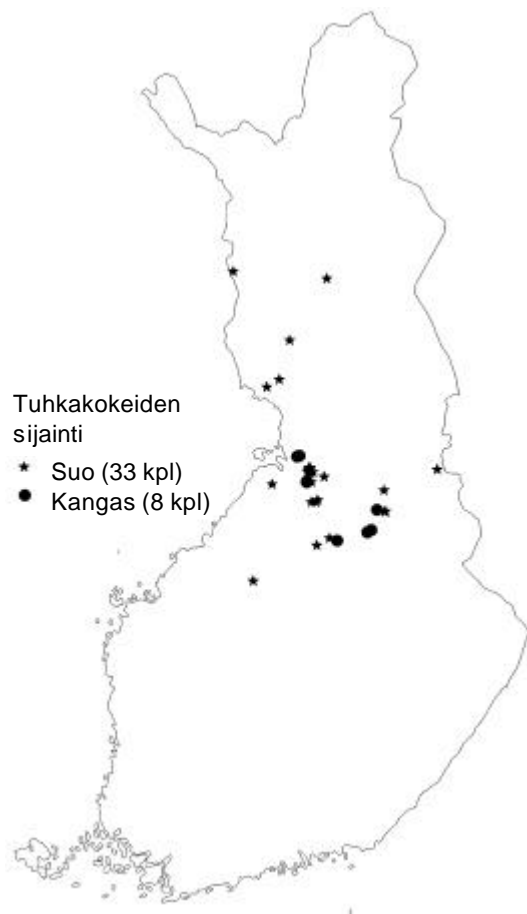
Erot pöly- ja esikäsiteltyjen tuhkien alkuainepitoisuuksien välillä johtuivat ainakin osittain polttoainekoostumuksen vaihteluista. Vertailtavat tuhkat eivät olleet peräisin samasta polttoerästä.

Koealat rajattiin ja tuhkat levitettiin lumien sullettua touko-kesäkuussa 1997. Tuhkan levityksessä pyrittiin siihen, että kutakin tuhkajia tulee koealoille sama määrä vedettömänä, kuivana tuhkana. Koska käsittelyjen tuhkien kosteuspitoisuus oli arvioitua suurempi, jäi käsittelyjen ravinnesisältö niillä pienemmäksi kuin pölytuhkakäsittelyissä (liite 3).

Metsäkokeiden lisäksi perustettiin maaliskuu-kesäkuussa 1998 Utajärven Rantosuolle ja Muhoksen Pelsolle maastokokeet, joiden avulla selvitetään tuhkan sisältämien ravinteiden ja alkuaineiden huuhtoutumista ojavesistöihin (ks. tarkemmin Issakainen 1999). Kokeissa käytettiin Metsä-Botnian Äänekosken puun pöly- ja itsekovetettua tuhkua sekä Fortumin Joensuun turvetuhkaa. Tuhkien käyttömäärä oli 5 t/ha (kuiva-ainetta). Näitä huuhtoutumiskokeita hyödynnettiin myös tuhkien metsävaikutusten tutkimisessa mm. marjojen ja sienien raskasmetallianalyseissä. Uusia tuhkakokeita hyödynnettiin myös mykorritsa-, mikrobisto- ja kaasupäästötutkimuksissa, joita tekivät Oulun, Jyväskylän ja Kuopion yliopistot.

2.2 Vanhat maastokokeet

Metlan Muhoksen tutkimusaseman perustamista ja edelleen seurannassa olevista vanhoista tuhkakokeista tähän tutkimukseen otettiin 35 koetta, joista 28 sisälsi puuntuhkakäsittelyjä ja 9 turvetuhkakäsittelyjä (liite 1). Näillä kokeilla tarkasteltiin tuhkalannoituksen pitkäaikaisvaikutuksia maaperään ja kasvillisuuteen. Kokeet sijaitsivat Oulun ja Lapin läänien alueella Metsäntutkimuslaitoksen, Metsähallituksen, UPM-Kymmene Oyj:n ja Oulun kaupungin mailla (kuva 1). Kokeista 29 oli perustettu ojitetulle turvemaalle ja 6 kangasmaalle. Tuhkan levityksestä oli kulunut aikaa kokeesta riippuen 9 - 52 vuotta (liite 2). Kaikissa tapauksissa tuhkakäsittelyt oli tehty pölytuhkalla. Käsittelyt oli toistettu kokeen sisällä 2 - 5 kertaa. Levitys oli tehty lähes poikkeuksetta miestyönä. Käsittelyissä puuntuhkien hehtaariannostus vaihteli välillä 0,5 - 15 t/ha ja turvetuhkien annostus välillä 4 - 100 t/ha. Tuhkamäärää porrastettiin usein kokeen sisällä (liite 3).



Kuva 1. Tutkimusmetsiköiden sijainti.

2.3 Aineiston keruu ja analysointi

Aineisto kerättiin vuosina 1997 - 1998. Tuhkan maaperävaikutusten selvittämiseksi kokeilta kerättiin humus-, turve- ja kivennäismaanäytteet. Kukin maanäyte koostui koealan keskipisteestä ja halkaisijoilta otetuista 5 - 0 osanäytteestä, jotka analyysivaiheessa yhdistettiin. Kangaskokeilla näytteet otettiin kolmesta kerroksesta, jotka olivat elävän kasvillisuuden alla oleva pintahumus sekä kivennäismaakerrokset 0 - 10 cm ja 10 - 20 cm. Suokohteilla vastaavat kerrokset olivat raakahumus ja turvekerrokset 0 - 10 cm, 10 - 20 cm, 20 - 30 cm ja 30 - 40 cm.

Marjanäytteet kerättiin marjojen kypsyysvaiheessa elo-syyskuussa 1997 ja 1998. Kuhunkin näytteeseen (1 - 2 kpl/koeala) kerättiin marjoja 2 - 2,5 dl. Yhdellä kangaskokeella (nro 31) mustikoista määritettiin alkuainepitoisuuksien lisäksi myös hehtaarikohtainen marjasato. Hillaa (*Rubus chamaemorus*), mustikkaa (*Vaccinium myrtillus*), puolukkaa (*Vaccinium vitis-idaea*) ja juolukkaa (*Vaccinium uliginosum*) saatiin vaihtelevasti sen mukaan, millainen oli satovuosi ja kasvupaikka. Eräillä kokeilla ei esiintynyt marjoja lainkaan, joiltakin taas saatiin useamman marjalajin näytteet. Marjat poimittiin muovisia suojakäsineitä käyttäen. Tuhkan kanssa välittömässä kosketuksissa olevia marjoja ei otettu näytteeseen mukaan.

Koealueilla esiintyi kesällä 1998 runsaasti sieniä. Näytteiksi kerättiin isohaperoita (*Russula paludosa*), kangasrouskuja (*Lactarius rufus*), haaparouskuja (*Lactarius trivialis*), kangastatteja (*Suillus variegatus*) ja pulkkosieniä (*Paxillus involutus*). Koelaa kohti otettiin 1 - 2 näytettä. Näyte koostui tuoreista - joko halkaistuista tai kokonaisista - itiöemistä, joita kerättiin 6 - 20 kpl. Maanpäällisestä osasta mukaan tulivat sienien lakki ja puolet jalasta. Sienetkin poimittiin muovisia suojakäsineitä käyttäen. Tuhkan kanssa välittömässä kosketuksessa olevia sieniä ei otettu mukaan. Kahden kokeen (36 ja 39) sienistä määritettiin alkuainepitoisuuksien lisäksi hehtaarikohtainen sato. Sienet eivät näyttäneet kärsineen tuhkakäsittelyistä. Uusilla tuhkakokeilla sienten havaittiin tunkeutuneen päivänvaloon jopa suoraan tuhkakasauman läpi.

Tuhkan aiheuttamia pintakasvillisuusmuutoksia tutkittiin pohja- ja kenttäkerroksen lajilukua ja peittävyyttä tarkastelemalla.

Puuston ravinnetilan ja tuhkalannoituksen aiheuttamien ravinnemuutosten arvioimiseksi kerättiin neulasnäytteitä ravinneanalyysiin. Näytteet kerättiin uusilla kokeilla joulukuussa 1998 eli 18 kuukautta levityksen jälkeen. Talvikaudella kerätyt neulasnäytteet olivat peräisin edellisenä kesänä syntyneistä vuosikasvaimista. Koeala-kohtainen näyte koostui 8 valtamännyn latvuksen yläosan eteläpuolisista 1 - 2 oksan kärkiversoista. Näyteoksat irrotettiin puusta oksaleikkurilla ja neulas oksista muovisia suojakäsineitä käyttäen.

Taimikko- ja riukuvaiheen puustoista tutkittiin ravinnelisäyksen vaikutusta puiden pituuskasvuun. Koealan keskipisteeseen rajattiin ympyräkoeala, jonka säde vaihteli puuston tiheyden ja koon mukaan siten, että mukaan tuli 40 - 50 puuta. Reunavaikutusten eliminoimiseksi ympyrän kehän ja viereisen koealan rajan minimietäisyyden tuli olla 5 metriä. Jokaisen ympyräkoelaan sisältyvän puun rinnankorkeuslähimitta mitattiin (mm). Ympyrältä valittiin 15 - 30 koepuuta, joiden vuotuiset pituuskasvut mitattiin lannoitusta edeltäneeseen kauteen saakka. Koepuista mitattiin myös pituus, tekninen laatu (oksaisuus, mutkaisuus ja haaraisuus), vihreän latvuksen pituus ja neulasvuosikertojen määrä. Lisäksi määritettiin erilaiset ravinnepuutokset, tuhot ja sairaudet.

Varttuneissa kasvatusmetsiköissä tutkittiin tuhkalannoituksen vaikutusta metsikön runkokuun tuotokseen. Koealalle rajattiin yksi tai kaksi ympyräkoealaa, joiden säde määräytyi puuston ja koealan koon mukaan. Kaikki ympyräkoealan puut (40 – 50 kpl) kartoitettiin (etäisyys, suunta) keskipisteeseen nähden ja niistä mitataan mittasaksilla rinnankorkeusläpimitta ($D_{1.3}$) puulajit, latvuserrokset ja puuryhmät eriteltyinä. Puidenluvun yhteydessä koepuut valittiin niin, että niitä saatiin 15 - 30 kpl kutakin koeympyrää kohti. Koepuut edustivat eri läpimittaluokkia. Lisäksi mukaan otettiin koealan kolme suurinta ja kolme pienintä puuta. Mikäli sekapuuston osuus kohosi yli 30 %:n, niin myös siitä valittiin omat koepuut. Koepuista mitattiin rinnankorkeusläpimitta, pituus ja pituuskasvut lannoitusta edeltäneeseen kauteen. Kaikista koepuista otettiin lisäksi kairanlastu, josta määritettiin lustomikroskoopilla vuotuinen sädekasvu (0,01 mm) lannoitusta edeltäneeseen kauteen saakka. Myös puiden tekninen laatu, latvusraja sekä erilaiset ravinnepuutokset, tuhot ja sairaudet määritettiin. Puustotunnukset laskettiin Metlassa kehitetyllä koealojen puustotietojen laskentaohjelmalla (KPL-ohjelmalla).

Tuhka-, maaperä- ja kasvinäytteet analysoitiin Muhoksen ja Kannuksen tutkimusasemilla sekä Metlan Keskuslaboratoriossa Vantaalla. Analysoitavat komponentit olivat aluminium (Al), arseeni (As), boori (B), kalsium (Ca), kadmium (Cd), kromi (Cr), kupari (Cu), rauta (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), mangaani (Mn), molybdeeni (Mo), typpi (N), natrium (Na), nikkeli (Ni), fosfori (P), lyijy (Pb), rikki (S), titaani (Ti), vanadiini (V) ja sinkki (Zn). Tuhkan alkuainepitoisuudet analysoitiin suolahappouutosta, maaperä- ja kasvinäytteiden typpihappouutosta mikroaaltouunihajotuksen jälkeen ICP-tekniikalla. Alkuainepitoisuudet esitetään tuloksissa näytteen kuivapainoyksikköä kohti. Maanäytteistä määritettiin myös tuore- ja kuivapaino, johtoluku ja pH (1:2,5). N määritettiin Kjeldahlmenetelmällä.

Suometsien lannoitusohjeissa suositetaan fosforia annettavaksi noin 40 ja kaliumia 80 - 90 kg/ha. Uusilla kokeilla suosituksen mukaisia annostuksia lähimpänä olivat Äänekosken tuhkan pienempi ja Voikkaan tuhkan suurempi käyttötaso.

3 TULOKSET

3.1 Maaperävaikutukset

3.1.1 Uudet kokeet

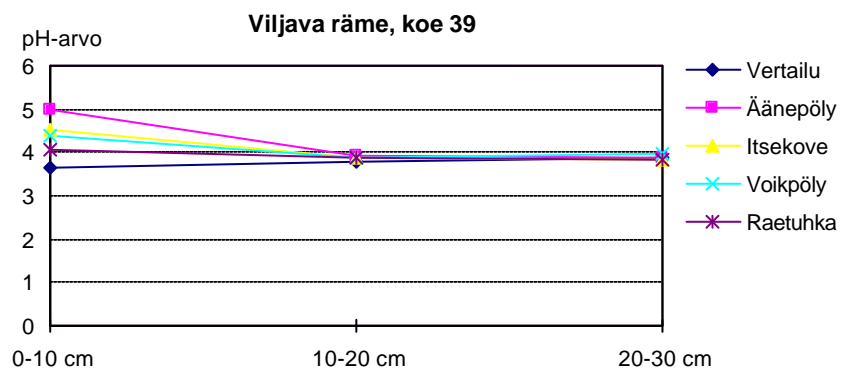
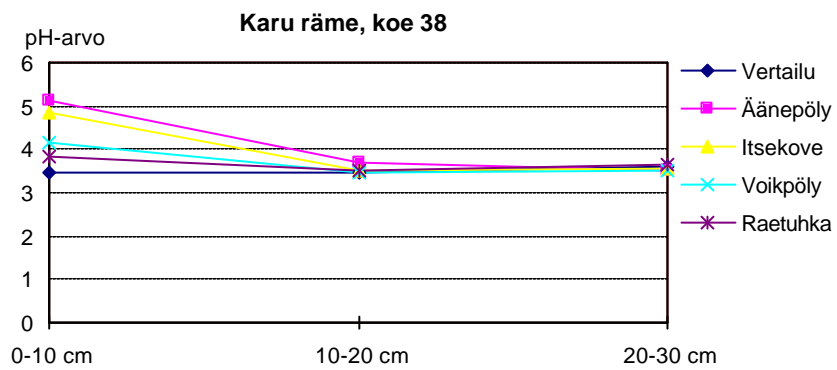
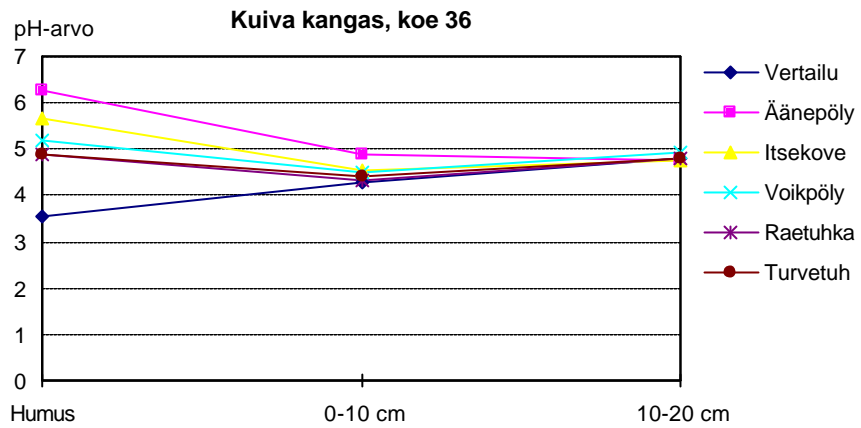
Maa-analyysien tavoitteena oli selvittää tuhkan aiheuttamia muutoksia kasvualustan ravinnepitoisuuksiin. Tarkasteluun on seuraavassa otettu kunkin tuhkalaadun suurempi käyttömäärä, joka oli turvemaiilla 15 ja kangasmailla 9 t/ha (ks. ravinnetiedot, liitteet 2 ja 3, kokeet 33 - 41).

Humuskerroksen pH-arvo oli kohonnut **kuivalla kankaalla** (koe 36) selvästi 16 - 17 kuukauden aikana tuhkan levityksestä (kuva 2). Käsittelyjen välillä havaitut erot riippuivat käytetyistä tuhkalaaduista: vaikutuksen suuruus oli yhteydessä tuhkan annostukseen ja sen sisältämään kalsiummäärään. Humuksen pH oli tuhkakäsittelyissä 1,4 - 2,8 pH-yksikköä lannoittamatonta vertailua (pH-arvo 3,5) korkeampi. Äänekosken pölytuhka alensi happamuutta enemmän kuin muut tuhkat. Turvetuhkakin vähensi tehokkaasti humuskerroksen happamuutta. Tuhkan happamuutta alentava vaikutus näkyi humuksen lisäksi kivennäismaan 0 - 10 cm:n pintakerroksessa, joskin lievempänä ja tilastollisesti merkitsevänä ainoastaan Äänekosken pölytuhkalla. Tuhkan välittömät (1 - 2 vuoden) vaikutukset rajoittuivat siis 2 - 4 cm:n vahvuiseen humuskerrokseen.

Tuhkakäsittelyt vaikuttivat kuivalla kankaalla muihinkin kasvualustan ominaisuuksiin. Tuhkan vaikutuksesta humuksen fosfori-, kalium-, kalsium-, magnesium-, mangaani- ja booripitoisuudet kohosivat selvästi (liite 4). Kupari-, natrium-, alumiini- ja arseenipitoisuudet olivat Voikkaan pölytuhka- ja Joensuun turpeentuhka-aloilla 2 - 4 kertaa muita käsittelyjä suuremmat. Lisäksi turvetuhka nelinkertaisti humuksen rauta- ja vanadiinipitoisuudet. Humuksen alla olevassa kivennäismaassa muutoksia ei todettu yhdenkään tutkitun alkuaineen osalta.

Maaperävaikutukset olivat huomattavia myös ojitetuilla turvemaidilla. **Karulla suolla** (koe 38) pintaturpeen (0 - 10 cm) happamuus alentui tuhkan vaikutuksesta 0,3 - 1,6 pH-yksikköä kahden kasvukauden aikana (kuva 2). Äänekosken tuhkan vaikutus happamuuteen oli Voikkaan tuhkaa suurempi. Syvemmissä turvekerroksissa selviä pH-muutoksia ei havaittu.

Pintaturpeen fosfori-, kalium-, kalsium-, magnesium-, mangaani- ja booripitoisuudet kohosivat etenkin Äänekosken tuhalla käsitellyillä aloilla. Molemmat puun-tuhkalaadut kohottivat selvästi pintaturpeen kupari-, natrium- ja nikkeliarvoja sekä Voikkaan tuhka lisäksi kromi-, alumiini- ja arseeniarvoja. Kadmiumpitoisuus oli korkein Äänekosken tuhka-alojen pintaturpeessa. Tuhkien vaikutus näkyi useimpien alkuaineiden osalta samansuuntaisena, joskin huomattavasti lievempänä, myös 10 - 20 cm:n turvekerroksessa (liite 5). Syvemmissä maakerroksissa käsittelyjen väliset erot tasoittuivat. Kuitenkin mm. kalium- ja natriumpitoisuudet olivat Äänekosken tuhka-aloilla vielä 20 - 30 cm:n syvyydessä vertailua korkeammalla tasolla. Tämä osoittaa kaliumin huuhtoutumisalttiutta, josta on saatu viitteitä aiemminkin (esim. Silfverberg & Issakainen 1991). Käsittelyjen väliset erot turpeen kaliumpitoisuuksissa jäivät suhteellisen vähäisiksi.



Kuva 2. Maaperän pintakerrosten pH-arvojen muutokset uusilla kokeilla. Tuhkakäsittelyistä kulunut 18 kuukautta.

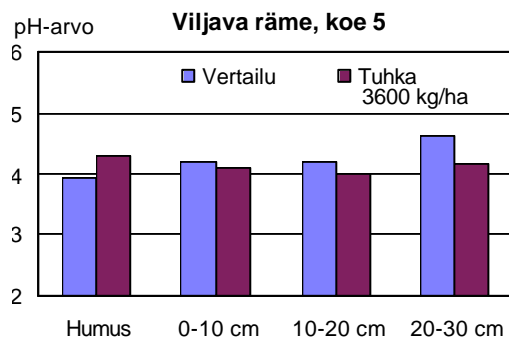
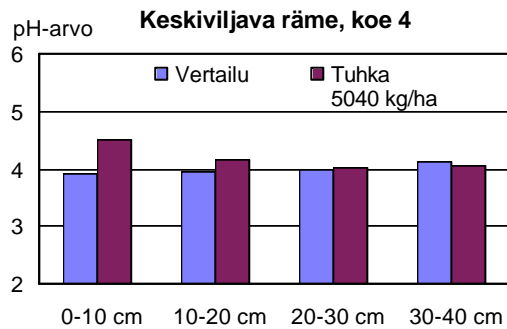
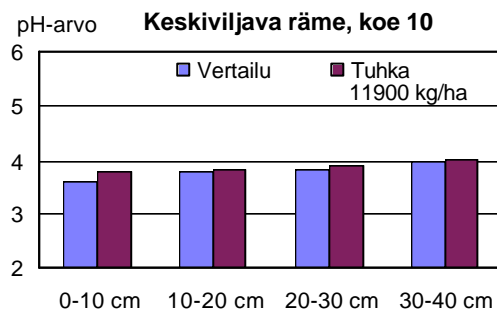
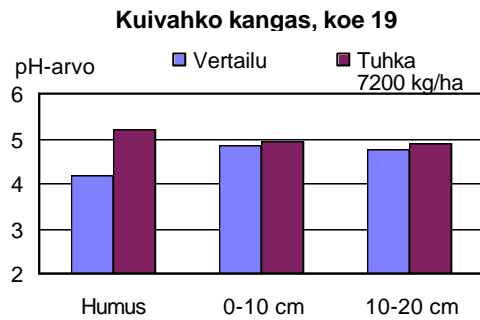
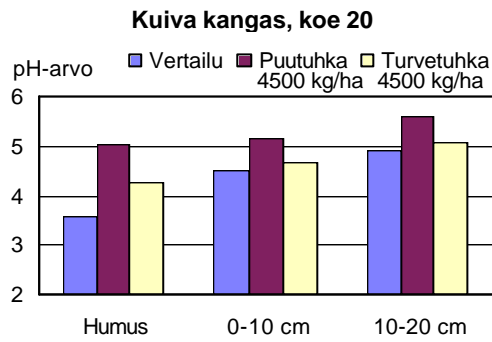
Viljavalla suolla (koe 39) pintaturpeen happamuuden muutokset olivat saman suuruiset kuin karulla suolla. 0 - 10 cm:n pintaturpeessa pH-luku kohosi lannoitamaan verrattuna 0,4 - 1,3 pH-yksikköä (kuva 2). Syvemmillä turpeessa erot tasoittuivat. Muutokset turpeen ravinne- ja alkuainepitoisuuksissa olivat hyvin samanlaisia kuin karulla suolla: fosfori-, kalium-, kalsium-, magnesium-, mangaani- ja booripitoisuudet kohosivat, samoin kupari-, natrium- ja nikkeliarvot sekä Voikkaan tuhalla lisäksi kromi-, alumiini- ja arseeniarvot (liite 6). Kadmiumpitoisuus oli korkein Äänekosken pölytuhka-aloilla. Syvemmillä käsittelyjen väliset erot näkyivät edelleen joskin pienentyneinä. Kalium- ja natriumpitoisuudet olivat 20 - 30 cm:n syvyydessä korkeimmat Äänekosken tuhka-aloilla. Tuhkan rakeistaminen tai itsekovetus ei näyttänyt hidastavan helpoliukoisten ravinteiden kulkeutumista syvemmälle turpeeseen.

3.1.2 Vanhat kokeet

Viidestä tutkimuskohteesta kaksi sijaitti kangasmaalla (EVT- ja ECT-tyypin männiköt) ja kolme ojitetulla suursara-ruohotason rämeellä. Kangasmaan kokeilla (nrot 19 ja 20) humuksen happamuuden vähentyminen näkyi selvänä vielä 9 - 19 vuoden jälkeen (kuva 3). Puuntuhkalla käsitellyn alan pH-arvot olivat kangashumuksessa 1 - 1,4 pH-yksikköä lannoittamattoman alan arvoja suuremmat. Toisella kangaskokeella vaikutus rajoittui humuskerrokseen, mutta toisella se näkyi 10 - 20 cm:n kivennäismaakerroksessakin. Samalla kokeella turvetuhkan vaikutus (0,6 pH-yksikön nousu) rajoittui humuskerrokseen.

Puuntuhkan vaikutus näkyi kangashumuksessa kohonneina fosfori-, kalium-, kalsium-, magnesium- ja booripitoisuuksina (liite 7). Kupari- ja mangaanipitoisuudet olivat tuhka-aloilla lannoittamattomia selvästi korkeammalla tasolla. Turvetuhka kohotti humuksen rautapitoisuutta karulla ECT-tyypin kankaalla (koe 20). Humuksen alla olevassa 0 - 20 cm:n kivennäismaakerroksessa vaikutukset eivät kuitenkaan näkyneet.

Puuntuhkakäsittely näkyi ojitettujen rämeiden pintaturpeen (0 - 10 cm) happamuudessa vielä 14 - 26 vuoden jälkeen lannoituksesta, joskin huomattavasti lievempänä kuin kangasmaan humuskerroksessa (kuva 3, liite 8). Havainto vahvistaa aiempien tutkimusten tuloksia puuntuhkan pitkäaikaisista maaperävaikutuksista (mm. Mälkönen 1998, Silfverberg & Hotanen 1989). Tuhka-aloilla pintaturpeen pH-arvot olivat kokeesta riippuen 0,2 - 0,6 yksikköä vertailualojen arvoja suuremmat. Syvemmissä turvekerroksissa happamuus oli samaa tasoa käsittelystä riippumatta.



Kuva 3. Maaperän pintakerrosten pH-arvot tuhkalannoituskokeilla, joissa käsittelyistä kulunut 9 – 26 vuotta.

Muhoksen Itkusuolla (koe 4) pintaturpeen 0 - 10 cm fosfori-, kalium-, kalsium-, magnesium-, boori-, kupari-, rauta- ja mangaaniarvot olivat vielä 26 vuoden kulluttua tuhkan levityksestä korkeammat tuhka-aloilla kuin vertailualoilla (liite 8). Vaikutus näkyi fosforia lukuun ottamatta merkitsevästi myös 10 - 20 cm:n syvyydessä. Sitä syvemmissä kerroksissa eroja ei esiintynyt. Normaalitasosta poikkeavia raskasmetallikertymiä ei tuhka-aloilla esiintynyt. Muilla suokokeilla ravinnepitoisuusmuutokset jäivät vähäisiksi tai rajoittuivat pintaturpeeseen.

Suuruusluokaltaan tämän tutkimuksen tulokset ovat samaa tasoa aiempien tutkimusten tulosten kanssa mm. pH-arvojen muutosten suhteen. Vaikutuksen rajoittuminen ylimpiin maakerroksiin on havaittu aiemminkin, samoin se, että turvemaidilla tuhka vaikuttaa pH-arvoihin vähemmän kuin kangasmailla (Silfverberg & Issakainen 1991).

3.2 Marjojen alkuainepitoisuudet

3.2.1 Uudet kokeet

Vuosina 1997 - 1998 perustetuilla kangasmaan kokeilla tutkittiin puolukan ja mustikan ravinne- ja alkuainepitoisuuksien vaihtelua kahtena levitystä seuranneena kesänä. Suokokeilla vastaavat tutkimukset tehtiin juolukasta ja hillasta. Tuhkan vaikutukset näkyivät marjoissa jo levitysvuonna ja samantyyppisinä kaikissa tutkimusmetsiköissä. Marjojen alkuainepitoisuuksien muutokset heijastelivat eri tuhkalatujen alkuainekoostumusta ja käytettyjä annostuksia.

Kuivalla kankaalla (koe 36) puolukan kaliumpitoisuus kohosi selvästi Äänekosken pölytuhkaa saaneilla koealoilla levitystä seuranneen kahden kuukauden aikana. Tuhkan käyttömäärästä riippuen kaliumpitoisuus oli 7,1 - 8,0 mg/g, kun se oli vertailualueen puolukoissa 5,5 mg/g. Äänekosken tuhkan vaikutus näkyi seuraavanakin kesänä (liite 9). Myös puolukoiden fosfori- ja rikkipitoisuudet suurensivat ainakin turvetuhkaa saaneilla aloilla hieman. Kupari- ja mangaanipitoisuudet yleensä hiukan alenivat tuhkan vaikutuksesta. Muitakin alkuainepitoisuuksien vaihteluita havaittiin.

Niillä koealoilla, joilla oli käytetty puun pölytuhkaa 9 t/ha (Äänekoski), puolukan natriumarvot olivat 10 - 22 mg/kg. Ne olivat selvästi lannoittamatonta vertailua, 5 mg/kg, suuremmat, kun tuhkan levityksestä oli kulunut kaksi kuukautta. Vuotta myöhemmin erot olivat tasoittuneet ja natriumpitoisuudet olivat lähellä määritysrajaa. Toisen kesäkauden päättyessä titaani-, arseeni- ja kromiarvot olivat tuhkaalojen puolukoissa paikoin määritysrajan

yläpuolella (liite 9). Käsittelystä riippuen titaanipitoisuus vaihteli välillä 0,5 - 0,8 mg/kg, arseenipitoisuus välillä 1,0 - 1,1 mg/kg ja kromipitoisuus välillä 0,2 - 0,5 mg/kg. Kadmiumpitoisuus jäi alle määrittäysrajan. Itsekovetetun ja raetuhkan mahdollinen pölytuhkaa hitaampi liukeneminen ei ollut havaittavissa puolukoiden alkuainepitoisuuksissa.

Tuoreella kankaalla (koe 41) Äänekosken pölytuhkaa saaneiden puolukoiden ja mustikoiden kalium- ja natriumarvot kohosivat levitysvuonna, mutta erot taasoituivat seuraavan vuoden kuluessa (liite 9). Turvetuhkaa suuren annoksen saaneilla koealoilla marjojen rautapitoisuus 2 - 3-kertaistui. Samanlaisen tuloksen saivat mm. Silfverberg ja Issakainen (1991). Muiden ravinteiden osalta muutokset jäivät vähäisiksi.

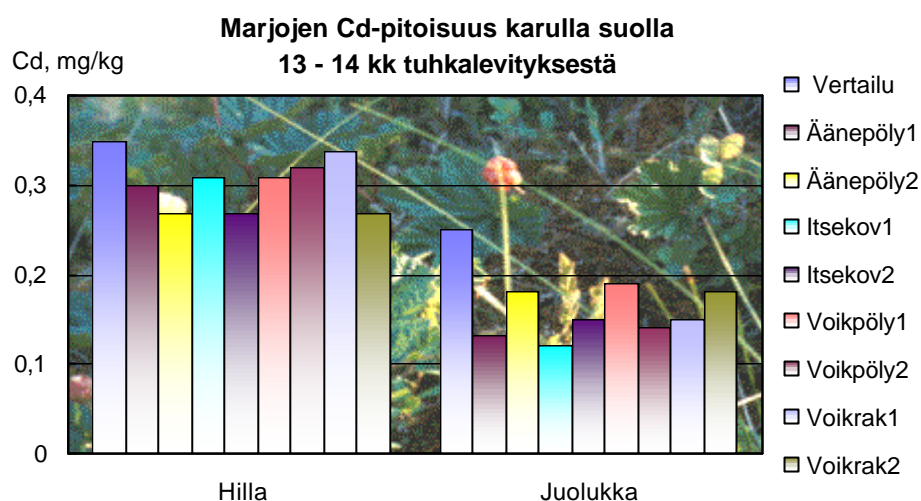
Puolukan ja mustikan titaani- ja natriumpitoisuudet kohosivat suurilla annoksilla saaneilla turvetuhka- ja puun pölytuhka-aloilla (Äänekoski). Titaaniarvot vaihtelivat tuhka-alojen puolukoissa välillä 0,5 - 3 mg/kg ja natriumarvot välillä 3 - 6 mg/kg. Kadmiumpitoisuudet jäivät kaikilla käsittelyillä alle määrittäysrajan.

Karulla suolla (koe 38) juolukan fosfori-, kalium- ja kalsiumpitoisuudet kohosivat Äänekosken pölytuhkan suuremmalla käyttömäärällä (15 t/ha) jo levityskesänä. Booriarvot kohosivat kaikilla tuhkakäsittelyillä. Vuotta myöhemmin samojen ravinteiden pitoisuudet olivat tuhka-alojen juolukoissa edelleen vertailua korkeammalla tasolla lähes kaikilla käsittelyillä (liite 10). Samantyyppinen tulos saatiin myös hillalla, jonka ravinnepitoisuudet kohosivat tuhka-aloilla. Toisaalta hillan mangaani- ja sinkkipitoisuudet näyttivät alentuneen Äänekosken pölytuhka-aloilla.

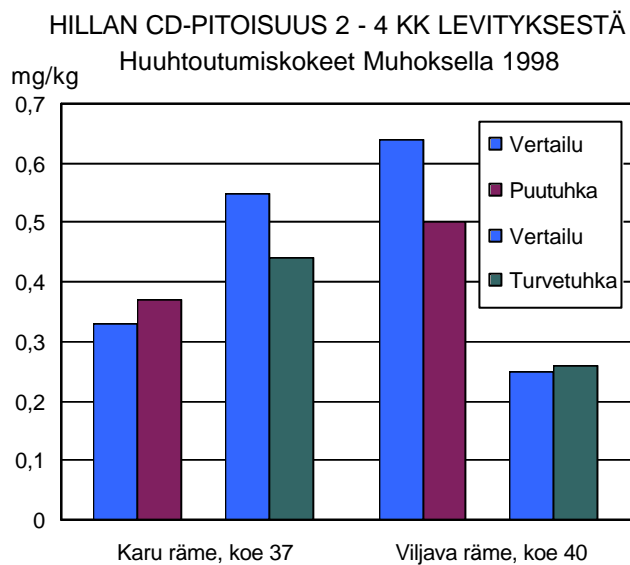
Sekä hillan että juolukan kadmiumarvot näyttivät tuhkakäsittelyillä lievästi alentuneen kahden kesän kuluessa (kuva 4). Aluminium- ja kromiarvot kohosivat tuhka-alojen marjoissa yksittäisissä tapauksissa paikoin vertailualaa korkeammalle tasolle, mutta havaintojen niukkuuden vuoksi varmoja johtopäätöksiä muutosten suuruudesta ei voitu tehdä.

Viljavalla suolla (koe 39) marjoja ei esiintynyt lainkaan kesäkausina 1997 - 1998, joten analyysituloksia ei sieltä ole toistaiseksi ollut käytettävissä.

Hillan alkuainekoostumus analysoitiin myös *tuhkan huuhtoutumista* selvittävillä kokeilla (nrot 37 ja 40). Turvetuhkakäsittelyn seurauksena hillan titaani-, arseeni- ja alumiinipitoisuudet näyttivät yksittäisissä tapauksissa hieman kohonneen. Kalium- ja booripitoisuudet keskimäärin nousivat ja kuparipitoisuus laski tuhkan vaikutuksesta, joskin muutokset olivat pieniä. Hillan kadmiumarvoihin puu- ja turvetuhkakäsittelyt eivät levityskesänä vaikuttaneet (kuva 5).



Kuva 4. Marjojen kadmipitoisuudet karulla suolla. Tuhkakäsittelyt 1 = 5 000 ja 2 = 15 000 kg/ha.



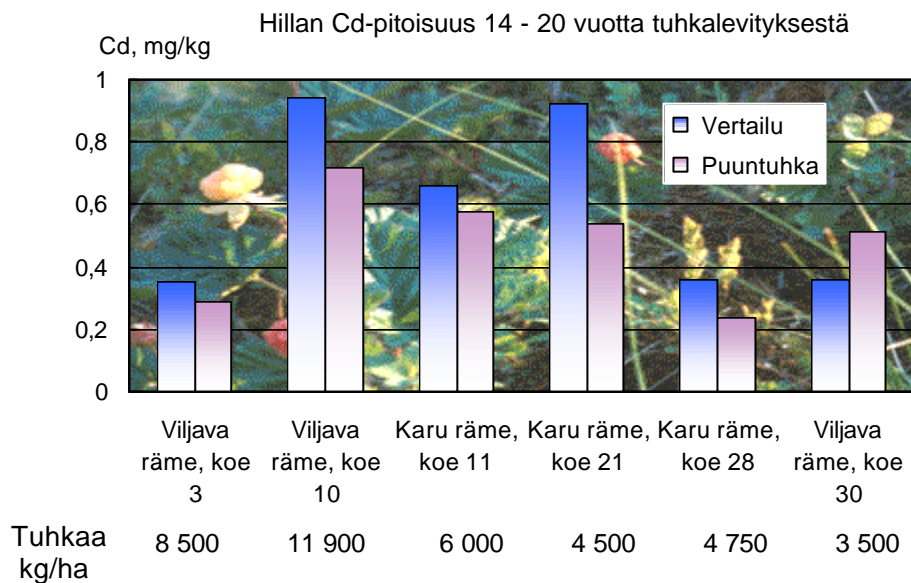
Kuva 5. Hillan kadmipitoisuudet tuhkan huutoutumista selvittävillä kokeilla. Puuntuhkaa 5 000 kg/ha (Äänekoski), turpentuhkaa 5 000 kg/ha (Fortum, Joensuu).

3.2.2 Vanhat kokeet

Marjanäytteet - kokeesta riippuen puolukka, mustikka, juolukka, hilla - kerättiin 10 - 20 vuotta aiemmin perustetuilta 15 tuhkalannoituskokeelta. Kokeista 4 sijait- si kankaalla ja 11 suolla.

Tuhkan vaikutukset jäivät yleensä pieniksi. Marjojen fosfori-, kalium- ja booriar- vot olivat suokokeiden tuhka-aloilla yleensä hiukan suuremmat kuin vertailualoilla. Muiden ravinteiden pitoisuuksien vaihtelu näytti satunnaiselta (liite 11).

Hillan kadmiumpitoisuus oli vanhojen kokeiden tuhka-aloilla yleensä selvästi pie- nempi kuin lannoittamattomilla koelaloilla. Pitoisuudet olivat vertailualoilla keski- määrin 0,55 ja puuntuhka-aloilla 0,45 mg/kg (kuva 6). Juolukan kadmiumpitoi- suus oli samaa tasoa käsittelystä riippumatta. Mustikan ja puolukan kadmiumarvot jäivät määritysrajan alapuolelle.



Kuva 6. Hillan kadmiumpitoisuudet turvemaan tuhkalannoitus- kokeilla.

Yhdessä tuoreen kankaan kokeessa (VMT, nro 31) marjojen alkuainepitoisuuksien muutokset olivat nähtävissä vielä 9 vuotta puuntuhkalannoituksen jälkeen: mustikan booriarvot olivat koholla ja mangaaniarvot alentuneet. Sen sijaan kadmiumpitoisuuksissa ei käsittelyjen välillä todettu eroja. Mustikkasato oli puuntuhka-aloilla (käyttömäärä 10 t/ha) vain vajaa puolet vertailutasosta. Puuntuhka siis näytti heikentävän mustikan marjomista. Turvetuhka (käyttömäärä 20 t/ha) sen sijaan ei vaikuttanut mustikkasatoon.

Yleinen tulos oli, että tuhka kohotti lyhyellä aikavälillä marjojen fosfori-, kalium- ja booripitoisuuksia. Kalsium-, alumiini- ja mangaaniarvot vaihtelivat. Heti levityksen jälkeisinä kahtena ensimmäisenä vuonna marjojen titaani-, arseeni-, kromi- ja joskus myös rikkipitoisuudet näyttivät väliaikaisesti kohonneen puuntuhka-aloilla ja rauta-arvot turvetuhka-aloilla. Muutokset riippuivat tuhkan laadusta ja heijastivat sen koostumusta. Kupari-, sinkki- ja kadmiumpitoisuudet pysyivät ennallaan tai alentuivat. Pitemmällä aikavälillä marjojen kadmiumin - joskus myös kuparin ja sinkin - pitoisuus keskimäärin alentui.

Marjojen hivenravinne- ja raskasmetallipitoisuuksien ennallaan pysymisen tai jopa alentumisen syynä voidaan pitää tuhkan kalkitusvaikutusta, jolloin metallien (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni) liukoisuus maaperässä vähenee ja siirtyminen kasvillisuuteen hidastuu. On tosin olemassa tutkimuksia, joissa suuret tuhka-annokset ovat kohottaneet mm. pajun ja perunan kadmiumpitoisuuksia (Bramryd 1985). Metallien liukoisuutta voivat vähentää tietyillä kasvupaikoilla myös niiden sitoutuminen rauta-, alumiini- ja mangaanioksideihin. Tässä saadut tulokset tukevat aiempia koti- ja ulkomaisia selvityksiä tuhkan vaikutuksista metsämarjoihin (Silfverberg & Issakainen 1991, Rosén ym. 1993, Rühling 1996).

Alustavat havainnot viittaavat siihen suuntaan, että marjatuotanto heikentyisi tuhkan vaikutuksesta. Marjasatojen heikentymisestä on tehty havaintoja myös kaupallisen PK-lannoksen metsäkäytön yhteydessä (Issakainen & Moilanen 1998).

3.3 Sienten alkuainepitoisuudet

3.3.1 Uudet kokeet

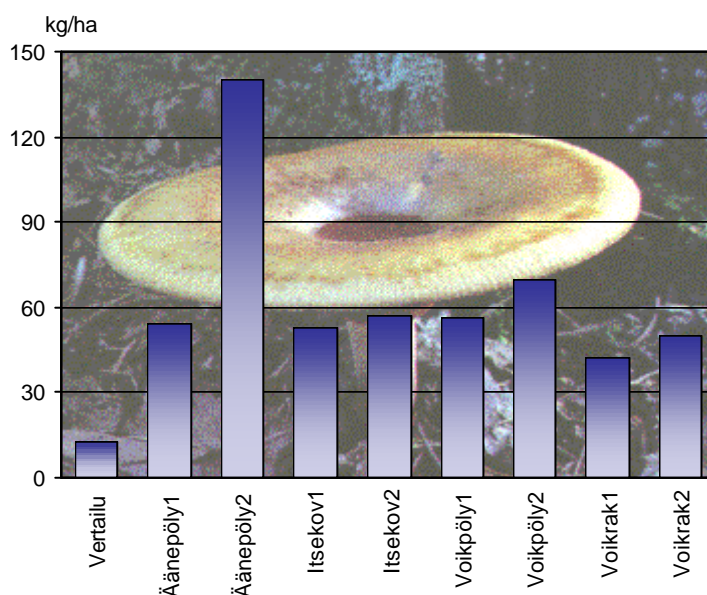
Kangasrouskunäytteistä tehdyn analyysin mukaan tuhka ei vaikuttanut selvästi minkään tutkitun alkuaineen pitoisuuksiin *kuivalla kankaalla* (koe 36), kun levityksestä oli kulunut reilu vuosi (liite 12). Boori- ja kalsiumarvot tosin olivat useimmilla tuhka-aloilla keskimäärin korkeampia kuin lannoittamattomilla aloilla. Turvetuhka näytti kohottaneen myös rautapitoisuutta. Kadmium käyttäytyi päinvastoin: korkeimmat arvot tavattiin lannoittamattomilla aloilla (vertailu 0,9 mg/kg, tuhkat 0,4 - 0,6 mg/kg). Kangasrouskun satomittaukset osoittivat sienisadon vaihdelleen välillä 25 - 90 kg/ha (tuorepaino) käsittelystä riippuen. Selvää käsittelyistä johtuvaa sadon lisääntymistä tai vähentymistä aineistolla ei kuitenkaan voitu osoittaa.

Tuoreella kankaalla (koe 41) tuhkalannoitus lisäsi kangasrouskun fosfori- ja kalsiumarvoja jo levityskesänä (liite 12). Turvetuhka lisäsi sienien rautapitoisuuttakin selvästi. Seuraavana vuonna erot tasoittuivat. Kadmiumpitoisuuksissa ei todettu merkittäviä muutoksia käsittelyjen välillä kumpanakaan vuonna. Kangasrouskun keskimääräinen kadmiumpitoisuus vaihteli välillä 0,5 - 1,2 mg/kg.

Karulla suolla (koe 38) isohaperon boori-, kalsium- ja mangaanipitoisuudet kohosivat tuhkallevitystä seuranneen kahden kuukauden aikana. Voikkaan tuhka näytti vaikuttaneen etenkin booriin, Äänekosken tuhka taas kalsiumiin. Vaikutus näkyi samanlaisena vuotta myöhemmin (liite 13). Alumiiniarvot olivat kahden kessäkauden jälkeen selvästi korkeimmat Voikkaan tuhkan suuremmilla käyttömäärillä. Kadmiumpitoisuuteen tuhkakäsittelyt eivät vaikuttaneet havaittavasti. Pitoisuus vaihteli vuodesta ja käsittelystä riippuen välillä 0,59 - 1,05 mg/kg.

Viljavalla suolla (koe 39) pulkkosienen aluminium- ja arseenipitoisuudet olivat kohonneet Voikkaan pölytuhkalla levitystä seuranneen 14 kuukauden aikana (liite 13). Samasta tuhkasta valmistetulla rakeella vaikutusta ei ilmennyt. Myös boori- ja kalsiumarvot näyttivät nousseen pölymäisillä tuhkillä enemmän kuin itsekovetulla tai raetuhkalla. Äänekosken tuhka vähensi merkittävästi pulkkosienen rautapitoisuutta ja kadmiumpitoisuudetkin (0,15 - 0,23 mg/kg) olivat tuhka-aloilla merkittävästi pienempiä kuin vertailualoilla (0,47 mg/kg).

Tuhkakäsittelyt - etenkin Äänekosken pölytuhkan suurempi annostus - lisäsivät pulkkosienen satoa monikertaisesti levityksen jälkeisenä toisena kesänä (kuva 7).



Kuva 7. Pulkkosienen sato viljavan rämeen kokeella (nro 39) kesällä 1998. Tuhkakäsittelyt 1 = 5 000 ja 2 = 15 000 kg/ha.

Sienten kadmiumpitoisuuksissa ei uusilla kokeilla havaittu olennaisia eroja eri tuhkakäsittelyjen välillä (taulukko 1). Pikemmin näytti siltä, että kadmiumarvot olivat tuhka-aloilla vertailuarvoja alemmalla tasolla, kun tuhkan levityksestä oli kulunut reilu vuosi.

TAULUKKO 1 Sienten keskimääräinen Cd-pitoisuus käsittelyittäin uusilla tuhkakokeilla vuosina 1997 - 1998 (kaikki kokeet yhdessä)

Käsittely	Cd, mg/kg
Vertailu	0,7
Äänekosken pölytuhka	0,5
Itsekovetettu tuhka	0,6
Voikkaan pölytuhka	0,5
Rakeistettu tuhka	0,5
Turvetuhka	0,4

Tuhkan huuhtoutumista selvittävällä kokeella (nro 37) analyysit tehtiin turvetuhka-aloilla isohaperosta, kangasrouskusta ja kangastatista. Yhdysvaikutuksia sienilajin ja tuhkakäsittelyn välillä ei todettu. Ensimmäisenä levityksen jälkeisenä kesänä sienten aluminium-, arseeni-, titaani-, boori-, kalsium-, natrium- ja fosforipitoisuudet olivat tuhka-aloilla selvästi vertailua korkeammalla tasolla.

3.3.2 Vanhat kokeet

Alkuaineanalyysit tehtiin kolmelta kangasmaan kokeelta ja yhdeksältä suokokeelta kerätyistä sieninäytteistä.

Kangasmaan kokeilla tuhka-levityksistä oli kulunut 10 - 20 vuotta. Yleensä sekä puun että turpeen tuhka kohottivat kangastatin ja kangasrouskun kalsium- ja ehkä myös booriarvoja. Raskasmetallipitoisuuksissa ei havaittu muutoksia lukuun ottamatta ECT-tyyppin kangaskoetta (nro 20), jolla kangasrouskun kadmiumpitoisuus oli puuntuhka-alalla merkitsevästi vertailua korkeammalla tasolla. Myös sinkki- ja kuparipitoisuudet olivat tällä kokeella kohonneet tuhkan vaikutuksesta. Muilla kokeilla kadmiumarvot joko säilyivät ennallaan tai hiukan laskivat.

Suokokeilla tuhkan levityksistä oli kulunut 13 - 52 vuotta. Tutkittujen sienten, haapa- ja kangasrousku sekä isohapero, ravinnepitoisuudet olivat käsittelyistä riippumatta samalla tasolla. Tosin tuhka-aloilla todettiin myös hiukan vertailualoja suurempia kalsium-, boori- ja joskus myös kaliumpitoisuuksia. Raskasmetallipitoisuuksiin tuhkakäsittelyillä ei ollut selvää vaikutusta. Joissakin kokeissa tuhkakäsittely näytti kohottaneen, toisissa kokeissa taas alentaneen kadmiumarvoja.

Tuhkan käyttötason ja sienten alkuainepitoisuuksien välillä ei havaittu selkeää riippuvuussuhdetta. Esim. kangasrouskun ravinnepitoisuudet kohosivat yleensä jo tuhkan pienimmällä käyttötasolla, mutta erot tuhkamäärien kesken jäivät pieniksi. Hivenravinne- ja raskasmetallipitoisuudet vastaavasti keskimäärin alentuivat tai pysyivät ennallaan. Taulukossa 2 esitetään analyysitulokset eräältä karun rämeen kokeelta, jossa puuntuhkan käyttömäärä vaihteli välillä 0 – 16 t/ha. Sienistä määritetyt kadmiumarvot olivat tällä kokeella koko tutkimusaineiston korkeimmat.

TAULUKKO 2 Kangasrouskun alkuainepitoisuuksia rahkämättäisellä tupasvillarämemuuttuman kokeella 23 (Muhos, Itkusuo). Levityksestä 13 vuotta.

Tuhkaa t/ha	P mg/g	K mg/g	B mg/kg	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Ni mg/kg
0	8	56	1,3	31	136	3,8	1,0
4	12	62	1,7	29	125	2,7	0,7
8	12	63	1,9	26	135	2,8	0,7
16	13	61	2,2	25	125	5,3	0,9

Keskimäärin sienten kadmiumpitoisuudet olivat vanhojen kokeiden tuhka-aloilla hiukan alhaisemmat kuin vertailualoilla (taulukko 3).

TAULUKKO 3 Sienten kadmiumpitoisuus vanhoilla tuhkakokeilla vuosina 1997 - 1998

Koe nro	Sienilaji	Kasvupaikka	Vuosis lannoituksesta	Cd, mg/kg	
				Vertailu	Tuhka
20	Kangasrousku	Kuiva kangas	19	0,8	1,9*
19	Kangastatti	Kuivahko kangas	9	1,3	1,5
17 ¹	Kangastatti	Kuivahko kangas	11	0,7	0,4
23	Kangasrousku	Karu suo	12	3,8	2,7
11	Isohapero	Karu suo	18	1,0	1,4
14	Haaparousku	Viljava suo	14	0,2	0,2
34	Haaparousku	Viljava suo	51	0,7	0,5
35	Haaparousku	Viljava suo	52	0,3	0,2
10	Isohapero	Viljava suo	14	1,2	1,7
30	Kangasrousku	Viljava suo	19	1,4	0,8*
4	Kangasrousku	Viljava suo	26	2,0	1,4
Keskiarvo				1,22	1,15

* = ero vertailuun tilastollisesti merkitsevä

¹⁾ = turvetuhkakoe, muut puuntuhkaa

Tuhka kohotti lyhyellä aikavälillä fosfori-, kalium- kalsium- ja booripitoisuuksia sienissä. Ravinnepitoisuuksien muutokset näkyivät useita vuosia - jopa 10 - 20 vuotta - tuhkallevityksen jälkeen (liite 14). Kadmiumarvot pysyivät pitkällä aikavälillä ennallaan tai joissain tapauksissa hiukan kohosivat. Kaiken kaikkiaan mitään oleellista sienten raskasmetallipitoisuuksien kohoamista ei analyyseissä todettu. Tulokset tukevat vastaavia ruotsalaisia selvityksiä (mm. Rühling 1996).

3.4 Pintakasvillisuusmuutokset

Alkukesällä 1997 perustetuilta tuhkakokeilta tehtiin kasvipeitekuvaus kesällä 1998. Tarkoitus on pitkällä aikavälillä seurata tuhkan aiheuttamia kasvilajiston muutoksia. On oletettavissa, että etenkin turvemaidella lajistomuutokset ovat suuria ja pitkäkestoisia (esim. Silfverberg & Hotanen 1989).

Vuosi tuhkallevityksen jälkeen todettiin eräiden sammal- ja jäkälälajien ruskettuneen etenkin suuria tuhkamääriä saaneilla koealoilla. Eri kasvilajien keskinäisten peittävyys-suhteiden muutosten tarkastelun analysointi edellyttää pitempiaikaista seuranta. Vaikutuksen kestosta ja voimakkuudesta saadaan tietoa myöhemmin tehtävillä uusintamittauksilla.

3.5 Puuston neulasreaktiot

3.5.1 Uudet kokeet

Tuhkalannoituksesta oli männyn neulasnäytteiden keruuhetkellä joulukuussa 1998 kulunut 18 kuukautta. Käsittelyn vaikutus riippui käytetystä tuhkalaadusta ja annostuksesta ja näkyi vain muutamissa ravinteissa. Äänekosken tuhka kohotti neulasten kaliumpitoisuutta enemmän kuin Voikkaan tuhka, boorin kohdalla tulos oli päinvastainen.

Kuivan kankaan kokeella (koe 36) oli kaikilla käsittelyillä havaittavissa lievää kalsiumpitoisuuksien kohoamista (vertailu 1,8 mg/g, tuhkat 1,9 - 2,3 mg/g, liite 15). Äänekosken pölytuhkan vaikutus näkyi lisäksi neulasten kohonneina kaliumpitoisuuksina (vertailu 5,3 mg/g, tuhka 6,2 mg/g). Myös itsekovetetun tuhkan suurempi käyttötaso kohotti neulasten kaliumpitoisuutta merkitsevästi. Neulasten sinkkipitoisuuden todettiin olevan kaikkien tuhkalaatujen suuremmalla annostuksella vertailuarvoja merkitsevästi korkeammalla tasolla (vertailu 45 mg/kg, tuhkat 52 - 54 mg/kg). Booripitoisuus kohosi eniten puuntuhkien suuremmilla käyttötasoilla (vertailu 17 mg/kg, tuhkat 20 - 29 mg/kg). Turvetuhka ei vaikuttanut booriarvoihin. Muissa tutkituissa ravinteissa tai alkuaineissa ei todettu käsittelyistä johtuvia eroja. Myös raskasmetallipitoisuuksien vaihtelut jäivät käsittelyjen välillä pieniksi. Tuhkan itsekovetuksen tai rakeistuksen mahdollisesta merkityksestä ravinteiden liukenevuuteen ja sitä kautta puustoon siirtymiseen ei saatu käsitystä näillä koejärjestelyillä.

Karulla suolla (koe 38) tuhkan vaikutukset ilmenivät samalla tavoin mutta voimakkaampina kuin kangasmaalla (liite 15). Neulasten kalsiumarvot kohosivat. Äänekosken tuhkaa saaneiden puiden kaliumpitoisuudet olivat vertailuarvoja merkittävästi korkeammat, mutta myös Voikkaan tuhka oli kohottanut kaliumarvoja (vertailu 4,0 mg/g, tuhkat 4,5 - 5,5 mg/g). Booripitoisuudet kohosivat kaikilla käsittelyillä selvästi ja eniten tuhkan suuremmilla käyttömäärillä (vertailu 11 mg/kg, tuhkat 19 - 36 mg/kg). Suuret tuhka-annokset kohottivat neulasten rikki-pitoisuuden tasolta 740 mg/kg keskimäärin yli 800 mg/kg:n. Puiden ravinnetila parantui tuhkaa saaneilla koealoilla, sillä lievä kohoaminen näkyi kaliumin ja boorin ohessa myös fosforipitoisuuksissa (vertailu 1,3 mg/g, tuhkat 1,3 - 1,6 mg/g).

Vastaavantyyppisiä muutoksia todettiin myös **viljavalla suolla** (koe 39). Tuhkan vaikutus oli yleensä voimakkain suuremmalla käyttömäärillä (liite 15). Neulasten kaliumpitoisuus kohosi Äänekosken tuhkan ansiosta puutosalueelta 3,3 mg/g tasolle 5,6 mg/g. Myös Voikkaan tuhka kohotti kaliumpitoisuutta, joskin vähemmän. Fosforiarvot kohosivat eniten Äänekosken tuhkaa saaneilla koealoilla - puuston ravinnetaloutta ajatellen muutos ei kuitenkaan ollut riittävä. Vertailupuiden neulasten fosforipitoisuus osoitti ankaraa puutostilaa (1,0 mg/g), eikä fosforin saatavuus ollut tuhka-aloillakaan tyydyttävä (1,1 - 1,4 mg/g). Lannoittamattomilla koealoilla myös booripitoisuus oli alhainen ja puutosrajan tuntumassa (7 mg/kg). Tuhka-aloilla pitoisuus oli merkittävästi korkeampi ja vaihteli käsittelystä riippuen välillä 12 - 21 mg/kg. Neulasten raskasmetallipitoisuuksissa ei suokokeilla ilmennyt käsittelyistä johtuvia merkittäviä eroja, vaikka esim. kupariarvot näyttivät keskimäärin alentuneen tuhka-aloilla.

3.5.2 Vanhat kokeet

Tuhkan pitkäaikaisvaikutuksia puuston ravinnetilaan selvitettiin kolmessa kangasmaa- ja kahdeksassa suometsikössä, joihin tuhka oli levitetty 9 - 51 vuotta aiemmin. Ravinneanalyysien mukaan puuntuhka kohotti soiden ojitusalueilla männynneulasten fosfori-, kalium- ja booripitoisuuksia (taulukko 4). Joillakin tuhka-aloilla myös neulasten kuivamassa (g/100 neulasta) ja kalsiumpitoisuudet olivat vertailuarvoja korkeammalla ja mangaani-, sinkki- sekä kupariarvot vertailuarvoja alhaisemmalla tasolla. Muiden alkuaineiden kohdalla käsittelyjen väliset erot jäivät pieniksi. Kangasmaakokeilla tuhkan vaikutus oli selvästi vähäisempi suokokeisiin verrattuna.

TAULUKKO 4 Männynneulasten ravinnepitoisuudet vanhoilla tuhkakokeilla. Tuhkan käyttömäärä kokeesta riippuen välillä 3,5 - 14 t/ha. T = turpeentuhkaa, S = sekatumhkaa, muut puuntuhkaa. * = arvo eroaa vertailusta merkitsevästi (p<0,05).

Kasvu- paikka	Koe nro	Vuosisi- levityk- sestä	Tuhkaa kg/ha	P kg/ ha	P-pitoisuus, mg/g		K kg/ha	K-pitoisuus, mg/g		B g/ha	B-pitoisuus, mg/kg	
					Nolla	Tuhka		Nolla	Tuhka		Nolla	Tuhka
Kuiva kangas	20	19	4 500	80	1,4	1,5	335	4,9	4,8	1 350	14	25*
			T 4 500	45		1,5	10		5,0	80		14
Kuivahko kangas	19	9	3 600	40	1,6	1,7	100	4,9	5,0	680	11	15
			7 200	85		1,8	200		5,6	1 370		18
Kuivahko kangas	18	14	S 10 000	95	1,3	1,4	55	4,9	4,9	420	13	13,9
Karu suo	21	15	4 500	135	1,3	1,6*	225	4,4	4,9*	1 880	12	25,9*
Karu suo	23	12	1 800	55	1,4	1,6	90	4,8	4,4	830	6	21*
			3 600	110		1,7	180		5,2	1 670		19
			7 200	215		1,7	360		5,4	3 340		25*
			14 400	425		1,8	720		5,3	6 670		27*
Karu suo	8	16	2 750	115	1,5	1,7	355	4,8	5,7*	1 510	11	21,0*
Viljava suo	4	26	5 040	60	1,1	1,3	325	3,0	3,9*	..	10	16,3*
Viljava suo	34	51	7 200	120	1,2	1,4*	615	3,4	4,4*	1 050	17	18
			14 400	240		1,7*	1 230		5,0*	2 100		20
Viljava suo	10	14	5 950	55	1,7	1,8	340	4,5	4,9	250	18	18
			11 900	110		1,8	680		5,2	500		21
Viljava suo	14	9	4 500	135	1,2	1,6*	225	3,0	4,2*	1 880	26	27,3
Viljava suo	7	16	4 500	135	1,3	1,6*	225	4,0	4,8*	1 880	13	20,5
Ankan puutoksen raja					1,3			3,5			5	

Taulukko jatkuu seuraavalla sivulla

Kasvu- paikka	Koe nro	Vuosia levityk- sestä	Tuhkaa kg/ha	N-pitoisuus, %		Cu g/ha	Cu-pitoisuus, mg/kg		Z g/ha	Zn-pitoisuus, mg/kg	
				Nolla	Tuhka		Nolla	Tuhka		Nolla	Tuhka
Kuiva kangas	20	19	4 500	1,2	1,1	800	2,7	2,8	4 050	42	45
			T 4 500			270		3,1	1 530		42
Kuivahko kangas	19	9	3 600	1,3	1,3	320	3,7	3,7	1 040	45	47
			7 200		1,3	650		3,6	2 090		46
Kuivahko kangas	18	14	S 10 000	1,2	1,2	840	3,5	3,7	3 500	47	48
Karu suo	21	15	4 500	1,3	1,2	660	3,6	3,5	3 360	50	46
Karu suo	23	12	1 800	1,4	1,4	290	3,8	3,7	1 340	50	42
			3 600		1,4	590		3,5	2 690		4,8
			7 200		1,4	1 180		3,3	5 370		4,7
			14 400		1,3	2 350		3,3	10 750		4,9
Karu suo	8	16	4 750	1,3	1,2	140	3,2	3,2	4 620	44	43
Viljava suo	4	26	5 040	1,3	1,6	..	3,8	3,4	..	43	37
Viljava suo	34	51	7 200	1,4	1,5	2 320	3,7	3,8	29 610	51	43*
			14 400		1,5	4 640		3,2*	59 210		30*
Viljava suo	10	14	5 950	1,4	1,3	500	3,9	3,7	2 080	41	41
			11 900		1,3	1 000		3,8	4 160		38
Viljava suo	14	9	4 500	1,4	1,4	660	3,1	2,9	3 360	45	38
Viljava suo	7	16	4 500	1,5	1,4	660	3,8	3,1	3 360	47	36
Ankaran puutoksen raja				1,2			2,0			40	

Turvetuhkavertailu oli mukana vain muutamalla kokeella, joten pitemmälle meneviä johtopäätöksiä on vaikea tehdä. Joissakin tapauksissa neulasten fosforipitoisuus oli turvetuhka-aloilla kohonnut.

Neulasanalyysin perusteella puusto poti karulla suolla lievää fosforin ja osin myös kaliumin puutosta. Tuhkakäsittelyt kohottivat levityksen jälkeisenä puolentoista vuoden aikana fosfori- ja etenkin kaliumpitoisuuden puutosrajojen (P 1,4 ja K 4,0 mg/g, Reinikainen ym. 1998) yläpuolelle. Viljavalla suolla vastaavat ravinnepuutokset olivat vielä ankarammat. Tuhkakäsittelyt kohottivat neulasten kalium- ja booriarvot selvästi puutosrajojen yläpuolelle. Vanhoilla suokokeilla neulasten ravinnepitoisuudet olivat yleensä puutosrajojen yläpuolella tuhkaa saaneilla koealoilla.

3.6 Puuston kasvureaktiot

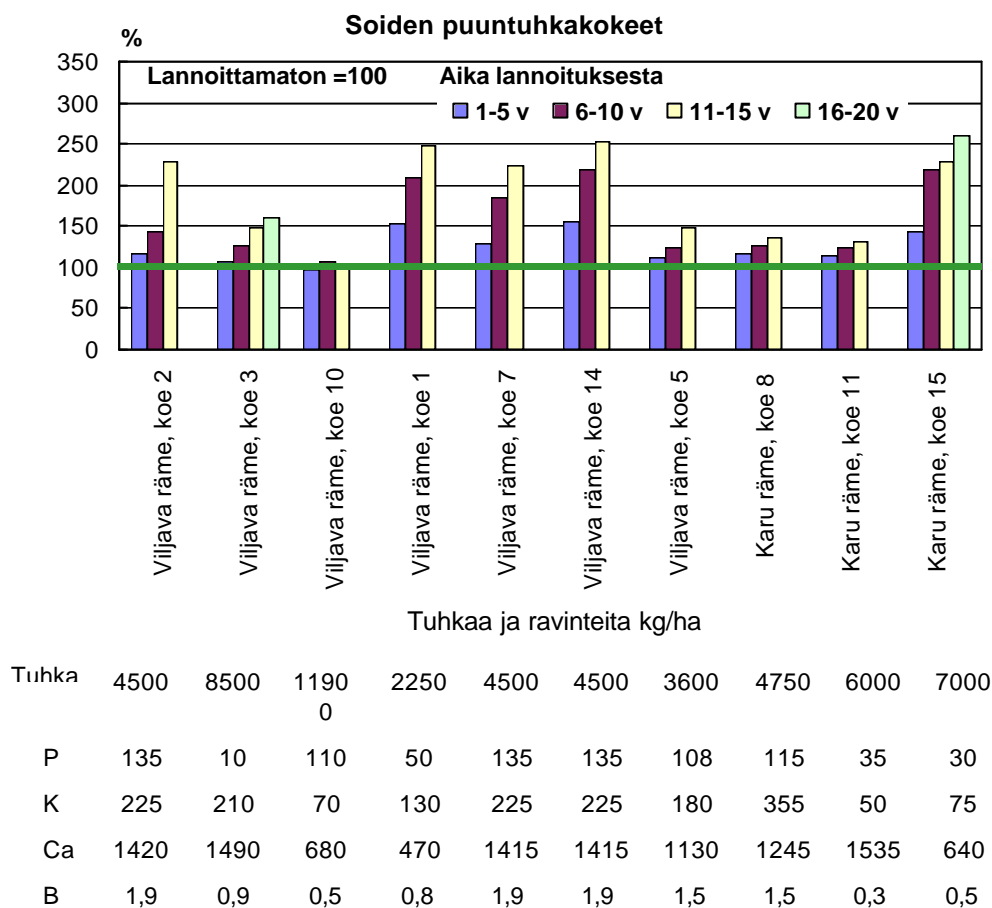
3.6.1 Uudet kokeet

Aiempien tuhkalannoitustutkimusten perusteella tiedetään, että tuhkan vaikutus puiden kasvuun ilmenee hitaasti, useamman vuoden viipeellä. Siksi uusien kokeiden puustoista ei vielä tehty kasvumittauksia. Tuhkakäsittelyjen aiheuttama kasvuvaste on tarkoitus määrittää myöhemmin 5-vuotis-jaksoittain tehtävillä puustokairauksilla, jolloin paljastuvat myös puiden vuotuiset kasvunvaihtelut ja lannoitusreaktio.

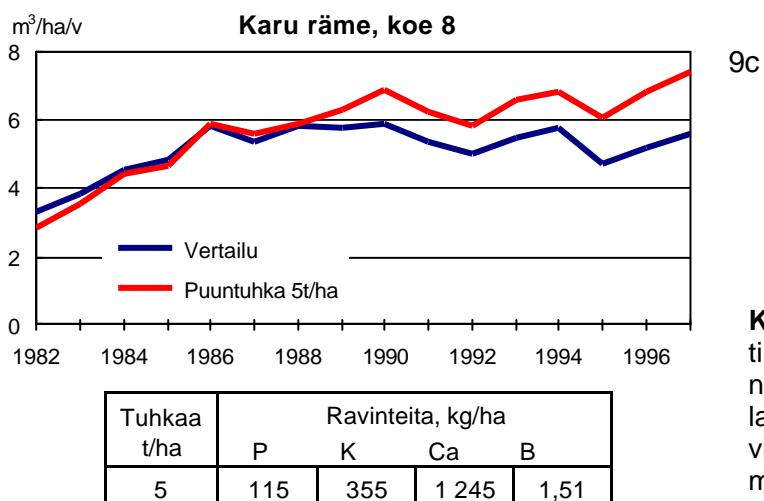
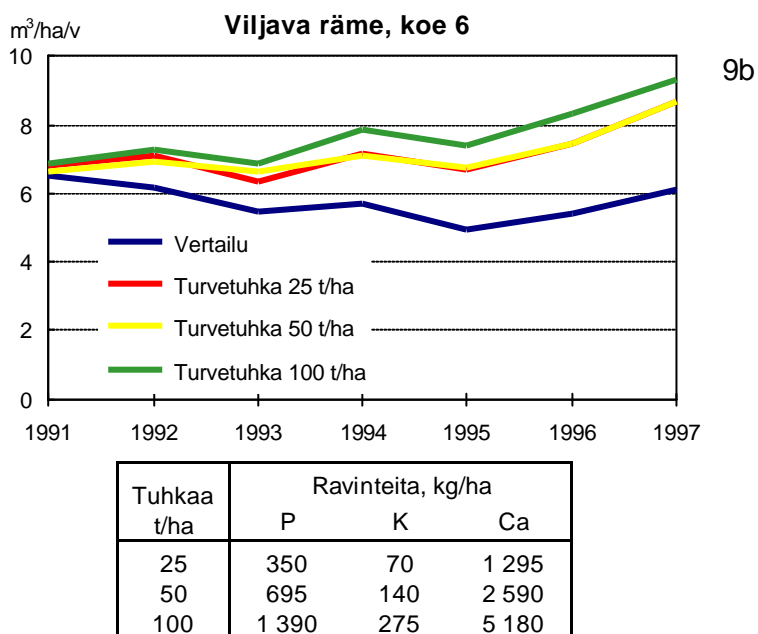
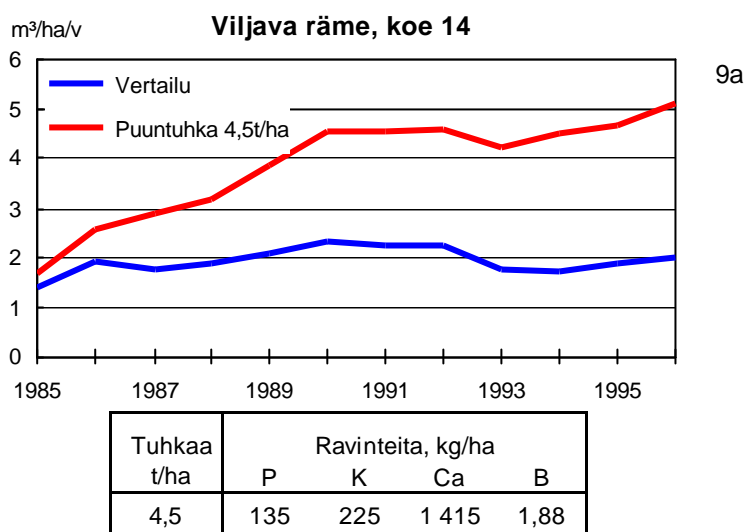
3.6.2 Vanhat kokeet

Kaikilla tutkituilla **suo-ojitusalueilla** tuhkalannoitus on lisännyt puuston tilavuuskasvua. Vaikutus myös jatkuu kaikissa kohteissa tutkimusjakson lopussa (kuva 8). Kaupallisella PK-lannoksella saatavaan puuston kasvureaktioon verrattuna tuhkan vaikutus osoittautui kuitenkin hitaammaksi. Selvä kasvun parantuminen ajoittui 3 - 4 vuoden päähän levityksestä, kun keinolannoitteiden vaikutus on alkanut yleensä jo 1 - 2 vuoden kuluessa. Tuhkareaktio ilmeni puustossa muutaman vuoden viipeellä, mutta jatkui vastaavasti pitempään ja näytti voimistuvan ainakin 15 - 20 vuoden ajan. Monessa tapauksessa puuston kasvu kaksinkertaistui tuhka-aloilla. Runsastyyppisillä kasvupaikoilla (viljavat rämeet) vaikutus näkyi kaikkein voimakkaimpana (kuva 9a-b). Myös turvetuhka lisäsi männyn tilavuuskasvua selvästi. Vastaavantyyppisiä tuloksia on saatu aiemmmissakin tutkimuksissa (Silfverberg & Huikari 1985, Silfverberg & Hotanen 1989, Ferm ym. 1992, Issakainen ym. 1994, Silfverberg 1996).

Karuilla tupasvilla- ja piensaratasen soilla tuhka alkoi vaikuttaa puuston kasvuun vasta 5 - 8 vuoden kuluttua, mutta joissakin tapauksissa yllättävän voimakkaana (kuva 9c). Karuilla ohutturpeisilla tai aiemmin lannoitetuilla kohteilla tuhkan vaikutus jäi kuitenkin keskimääräistä vähäisemmäksi. Yleensä puuntuhka on lisännyt puuston kasvua selvästi enemmän kuin turpeentuhka. Suuretkaan käyttötasot eivät vaikuttaneet haitallisesti suopuuston kehitykseen tai terveydentilaan. Päinvastoin, puustoreaktiot olivat pitkällä aikavälillä monesti sitä voimakkaammat mitä enemmän puun- tai turpeentuhkaa oli käytetty. Puuntuhka lisäsi suomännikön vuotuista kasvua parhaimmillaan n. 6 m³/ha ja turpeentuhka n. 3 m³/ha. Käyttömäärät olivat tuolloin 16 t/ha puuntuhka ja 100 t/ha turvetuhka.



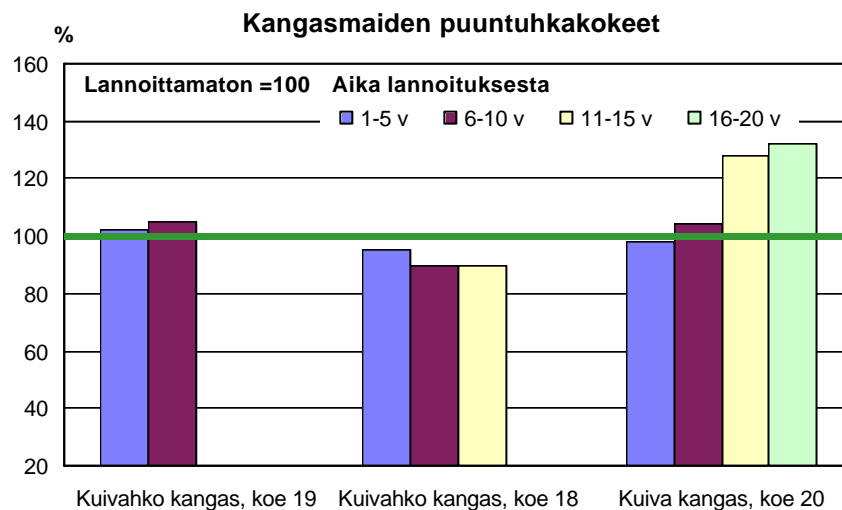
Kuva 8 Männyn suhteellinen tilavuuskasvu suokokeilla 5-vuotisjaksoittain tuhkalannoituksen jälkeen.



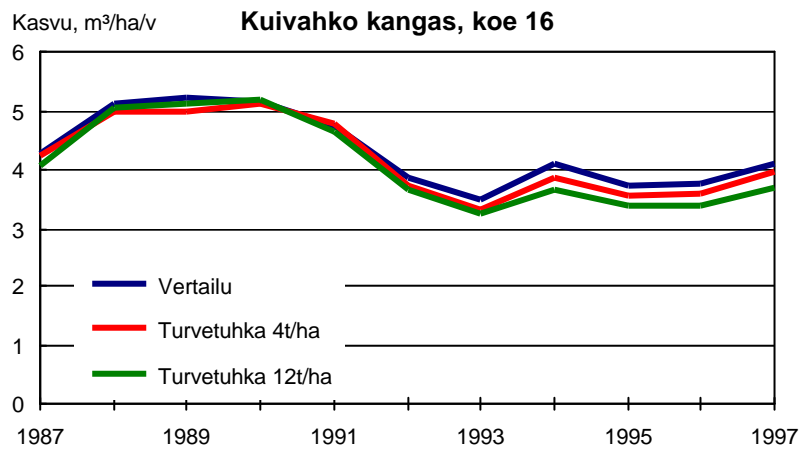
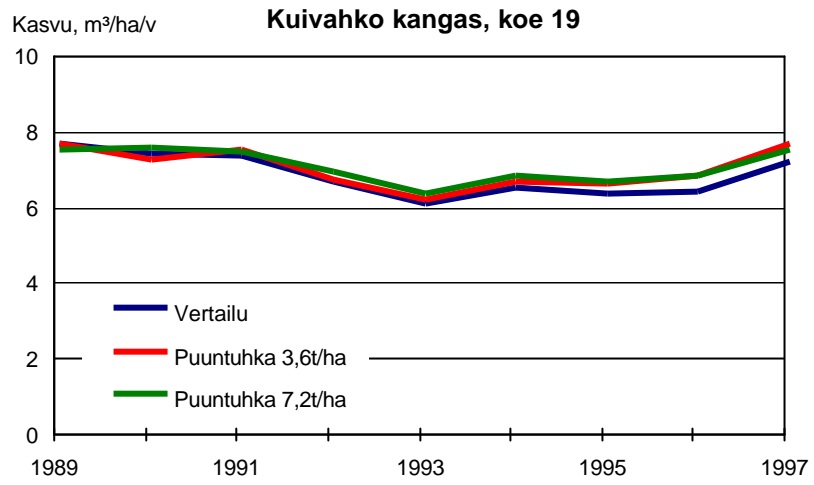
Kuva 9a-c. Männyn tilavuuskasvun vuotuisen kehitys tuhka-lannoitusten jälkeen viljavalla ja karulla rämeellä.

Käytetyillä fosfori- ja kaliumannostuksilla ei kuitenkaan ollut selvää yhteyttä puuston kasvureaktioon. Läheskään aina kasvu ei voimistunut, kun tuhkaannoksen sisältämä fosforimäärä kohosi tasolle 50 kg/ha tai sen yli. Joskus havaittavia kasvunlisäyksiä saatiin jo 20 - 40 kilon hehtaariannostuksilla. Kasvunmuutosten suuruus näytti riippuvan enemmänkin kasvupaikasta ja tuhkan laadusta kuin sen annostuksesta.

Tutkituilla **kangaskokeilla** puu- ja turvetuhkalannoitukset eivät ole lisänneet männyn runkopuun tuotosta (kuvat 10 - 11). Tulos vahvistaa aiemmin esitettyjä arvioita tuhkan heikosta vaikutuksesta kivennäismailla (Levula 1991, Mälkönen 1998). Monesti kävi jopa päinvastoin - puuston kasvu heikentyi tuhka-aloilla. Ainoa poikkeus oli ECT-typin kuiva kangas (koe 20), jossa tuhkan lisäksi oli käytetty typpilannoitetta. Typen vaikutuksen päätyttyä puusto kasvoi tuhka-aloilla selvästi paremmin kuin lannoittamattomilla aloilla.



Kuva 10. Männyn suhteellinen tilavuuskasvu kangasmaan tuhkalannoituskokeilla 5-vuotisjaksoittain. Kokeessa 20 on levitetty tuhkan ohella typpilannoitetta.



Kuva 11. Männyn tilavuuskasvun vuotuinen kehitys tuhkalannoitusten jälkeen kuivahkoilla kankailla.

4 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää puun ja turpeen tuhkan vaikutukset kangas- ja suometsien maaperään ja puustoon sekä metsäsienten ja marjojen ravinnepitoisuuksiin ja satomääriin. Lisäksi oltiin kiinnostuneita tuhkien sisältämien raskasmetallien - etenkin kadmium - mahdollisesta kertymisestä marjoihin ja sieniin. Samoin pyrittiin arvioimaan, voidaanko tuhalla parantaa metsäpuiden kasvua ja korjata niiden ravinnepuutoksia metsäojitusalueilla tai ehkäistä ennalta maaperän happamoitumisen hättävaiikutuksia kangasmailla.

Kysymyksiin haettiin vastauksia maastokokeilta, jotka oli perustettu Metsäntutkimuslaitoksen Muhoksen tutkimusalueeseen vuosina 1997 - 1998 ja 1970 - 1980-luvuilla. Uusilla kokeilla selvitettiin puun kuorituhkan ja turvetuhkan välittömiä metsävaikutuksia ja vanhoilla kokeilla niiden pitkäaikaisia vaikutuksia. Kokeissa käytettiin vaihtelevia määriä puun ja turpeen pölytuhkia, jotka olivat peräisin useista eri teollisuuslaitoksista ja lämpövoimaloista. Uusimmissa kokeissa kokeiltiin myös rakeistettua ja itsekovettunutta puuntuhkaa.

Tuhkien erilainen alkuainesisisältö ja käyttömäärä heijastuivat myös vaikutusten voimakkuudessa. Kaikki tuhkalaadut kohottivat levitystä seuranneen 14 kuukauden aikana maaperän pH-arvoa voimakkaasti. Happamuuden alentumisen suuruus riippui tuhkan käyttömäärästä ja oli kangaskokeilla suurempi kuin suokokeilla, vaikka käytetyt tuhka-annokset olivat kankailla pienempiä. Happamuuden alentuminen näkyi lähinnä kangasmaan humuskerroksessa ja turvemaan 0 - 10 cm:n pintakerroksessa. Syvemmällä muutokset olivat vähäisiä. Tuhkien vaikutus näkyi useiden ravinteiden, mutta myös raskasmetallipitoisuuksien kohoamisena kasvualustan pintakerroksessa. Suokokeilla eräät helppoliukoiset ravinteet (mm. kalium) näyttivät kulkeutuneen myös syvempiin turvekerroksiin. Selvää kuvaa tuhkan rakeistuksen tai itsekovetuksen merkityksestä ei tähänastisten tulosten perusteella voitu luoda. Tulosten perusteella on kuitenkin pääteltävissä, että tuhkan esikäsitely ei hidastanut nopealiukoisten ravinteiden vapautumista maaperään. Esimerkiksi kaliumpitoisuudet olivat kasvualustassa samaa suuruusluokkaa kaikilla käsittelyillä.

Tuhkan kulkeutumista maaperässä on syytä seurata edelleen useamman vuoden ajan pitkäaikaisvaikutusten selvittämiseksi. On oletettavissa, että tuhkan liukene-
misen jälkeen ravinteiden siirtyminen vedenvirtauspaikkoihin ja ojastoihin olennaisesti nopeutuu. Mahdollisesti tämä ilmiö ajoittuu 2 - 3 vuoden päähän levityksestä. Samoin on tarkemmin seurattava erilaisten tuhkalaatujen (pölymäinen, kokkareinen, eri tavoin rakeistettu) liukoisuuseroja sekä laboratoriotestein että kenttäkokein.

Tuhkan vaikutukset näkyivät marjoissa jo levitysvuonna. Alkuainepitoisuuksien muutokset heijastelivat eri tuhkalaatujen vaihtelevaa alkuainekoostumusta ja käy-

tettyjä annostuksia. Marjalajien väliset alkuaineiden luontaiset pitoisuuserot olivat huomattavia. Fosfori-, kalium-, kalsium- ja booripitoisuudet yleensä kohosivat jo levityskesänä tai viimeistään seuraavana vuonna. Suuria tuhka-annoksia käytettäessä myös eräiden raskasmetallien (kromi, titaani, arseeni) pitoisuudet kohosivat marjoissa. Kadmiumarvot pysyivät ennallaan tai näyttivät hiukan alentuneen. Itsekovetetun ja raetuhkan mahdollinen pölytuhkaa hitaampi liukeneminen ei ollut havaittavissa marjojen alkuainepitoisuuksissa. Vanhoilla tuhkakokeilla, joilla tuhkan levityksestä oli kulunut 10 - 20 vuotta, marjojen alkuainepitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa riippumatta käsittelystä. Hillan kadmiumpitoisuus näytti pitkällä aikavälillä pienentyvän. Eräällä kangasmaakokeella puuntuhka vähensi mustikan satoa.

Tuhka kohotti lyhyellä aikavälillä sienten fosfori-, kalium-, kalsium- ja booripitoisuuksia. Joissakin tapauksissa myös alumiini-, arseeni- ja kromiarvot kohosivat välittömästi levitystä seuranneiden kuukausien aikana, samoin rautapitoisuus turvetuhka-aloilla. Kadmiumpitoisuuksissa selviä muutoksia ei havaittu. Eräällä kokeella tuhkakäsittelyt lisäsivät voimakkaasti pulkkosienen määrää typpirikkaalla rämeellä, kun levityksestä oli kulunut vuosi.

Ravinnepitoisuuksien muutokset näkyivät sienissä useita vuosia - jopa 10 - 20 vuotta - tuhkalevityksen jälkeen. Kadmiumarvot pysyivät pitkällä aikavälillä ennallaan tai joissain tapauksissa hiukan kohosivat. Sienten raskasmetallipitoisuuksien selviä muutoksia ei analyseissä todettu, vaikka vanhimmilla kokeilla tuhka oli levitetty yli 50 vuotta aiemmin. Tulokset osoittavat, että tuhkan sisältämä kadmium sitoutuu maaperään useiden kymmenien vuosien ajaksi, eikä sitä näin ollen tuona aikana kertyne merkittävästi ainakaan marjoihin tai sieniin. Raskasmetallien pitoisuudet tuhka-alojen marja- ja sienikasvustoissa eivät poikenneet olennaisesti niistä vaihtelurajoista, joita Suomessa alueelta tehdyissä selvityksissä on raskasmetallien osalta aiemmin esitetty (mm. Hårdh 1977, Varo ym. 1980, Nuorteva 1990, Reimann ym. 1998).

Marjojen ja sienten alkuaine- ja raskasmetallipitoisuuksissa todettiin heti levityksen jälkeisenä vuonna voimakkaita hyppäyksiä ylöspäin. Näitä "pitoisuuspiikkejä" on tarpeen seurata edelleen vaikutuksen keston selvittämiseksi ja samalla arvioida niiden merkitystä esimerkiksi sienten käyttökelpoisuuteen ihmisravintona. Samoin on selvitettävä se, kuinka voimakasta tuhka-aloilla paikoin havaittu marjasatojen vähentyminen käytännössä on ja mistä se johtuu. Lisäselvitysten tarvetta korostaa myös se, että kohonneita raskasmetallipitoisuuksia (kadmium mukaan lukien) tavattiin vanhoilla tuhka-aloilla eräissä kenttäkerroksen kasvilajeissa (esim. vaivaiskoivu). Tästä syystä tutkimusta on ulotettava mm. riistaeläinten ravintokasvien laatuselvityksiin tuhkalannoitetuilla alueilla.

Puustoreaktioista saadut tulokset vahvistavat aiempia kokemuksia tuhkan myönteisestä vaikutuksesta puuston kehitykseen ojitetuilla soilla. Neulasten kalsium-, boori-, kalium- ja joskus myös fosforipitoisuudet kohosivat levitystä seuranneen puolentoista vuoden aikana. Vaikutus näkyi suokokeilla voimakkaampana kuin kangasmaan kokeilla. Ravinneolojen parantuminen osoittautui neulasanalyysin perusteella olleen pitkäaikainen - jopa vuosikymmeniä kestävä. Metsänkasvatuksen tavoitteita ajatellen tuhkalannoitusten käytännön hyödyt siis painottuivat selvästi turvemaiden suunnalle. Ojitusalue metsien ravinnetalous useimmiten tasapainottui ja puuston kasvu voimistui merkittävästi.

Vanhoilla suokokeilla tehdyt puustomittaukset osoittivat tuhkan vaikutuksen riippuvan kasvualustan viljavuudesta ja aiemmista lannoituksista. Tuhkalannoitus tuotti suhteellisen heikon tuloksen sellaisissa kohteissa, jotka oli lannoitettu kaupallisella PK-lannoksella kertaalleen jo aiemmin. Runsastyyppisillä kasvupaikkatyypeillä puuntuukka alkoi lisätä männyn runkopuun kasvua jo 2 - 3 vuoden kuluessa, kun taas niukkatyyppisissä kohteissa selvä reaktio alkoi ilmetä vasta 7 - 8 vuotta levityksestä. Tuhkan vaikutus oli alkuvuosina vähäisempi verrattuna esim. PK-lannoksen vaikutukseen, mutta ajan mittaan voimistui niin, että 10 vuoden kuluttua tuhkaa saaneet puut kasvoivat yhtä hyvin tai paremmin kuin PK-lannoitetut puut. Turvetuhkan vaikutus jäi selvästi puuntuuhkan vaikutusta heikommaksi.

Kangasmaiden tuhkalannoitus ei ole metsänkasvatusmielessä perusteltua. Puuston kasvureaktio jäi olemattomaksi tai tuhkakäsittely jopa heikensi kasvua. Tuhka siis epätasapainotti kivennäismaan ravinneoloja puuston kannalta: käyttökelpoisen typen niukkuus korostui entisestään. Eräässä kangasmaamännikössä tuhkan ja typen yhteiskäyttö kuitenkin antoi positiivisen tuloksen, joten olisi ehkä syytä selvittää enemmänkin tällaisen lannoitteiden yhteiskäytön mahdollisuuksia.

Suurten tuhkan käyttömäärien havaittiin paikoin polttaneen eräitä pohja- ja kenttäkerroksen kasvilajeja. Kovin suuria muutoksia kasvillisuudessa ei ollut kahden vuoden aikana ennättänyt tapahtua. Hankkeen kuluessa perustetut kenttäkokeet luovat hyvän pohjan kasvillisuuskoostumuksen lajistosuhteiden ja diversiteetin muutosten pitkäaikaiseen seurantaan. Vanhoilta kokeilta saadut kokemukset viittaavat siihen suuntaan, että muutokset etenkin soilla ovat hyvin voimakkaita ja pitkäkestoisia.

KIRJALLISUUTTA

- Bramryd, T.** 1985. Torv- och vedaska som gödselmedel - effekter på produktion, näringsbalans och tungmetalluptag. Statens naturvårdsverk. PM 1997. 83 s.
- Ferm, A., Hokkanen, T., Moilanen, M. & Issakainen, J.** 1992. Effects of wood bark ash on the growth and nutrition of a Scots pine afforestation in central Finland. *Plant and Soil* 147: 305 - 316.
- Hårdh, J. E.** 1977. Raskametallit ravintokasveissa ja maassa. Summary: The heavy metals in alimentary crops and in soils. *Maataloustieteellinen aikakauskirja* Vol. 49: 209-220.
- Issakainen, J.** 1999. Vuosina 1997-98 perustetut tuhkalannoituskokeet. Moniste Metsäteho Oy:ssä ja Metlan Muhoksen tutkimusasemalla.
- Issakainen, J. & Moilanen, M.** 1998. Lannoituksen vaikutus puolukka- ja mustikkasatoihin ja marjojen ravinnepitoisuuksiin kangasmailla. *Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia* 3/1998: 379-391.
- Issakainen, J., Moilanen, M. & Silfverberg, K.** 1994. Turvetuhkan vaikutus männyn kasvuun ja ravinnetilaan ojitetuilla rämeillä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 499. 22 s.
- Levula, T.** 1991. Tuhkalannoitus kangasmailla. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 394: 49-59.
- Mälkönen, E.** 1998. Tuhkan merkitys kivennäismailla. Julkaisussa: Paula Anttila & Antti Korpilahti (toim.). Tuhkahankkeen väliseminaari 1998. *Metsätehon raportti* 52: 11-13.
- Nuorteva, P.** 1990. Metal distribution patterns and forest decline. Seeking Achilles' heels for metlas in Finnish forest biocoenoses. *Publications of the Department of Environmental Conservation at the University of Helsinki*, N:o 11. 77 s.
- Reimann, C., Äyräs, M., Chekushin, V., Bogatyrev, I., Boyd, R., Caritat, P. de, Dutter, R., Finne, T.E., Halleraker, J.H., Jæger, Ø., Gashulina, G., Lehto, O., Niskavaara, H., Pavlov, V., Räsänen, M.L., Strand, T. & Volden, T.** 1998. Environmental geochemical Atlas of the Central Barents region. NGU-GTK-CKE special publication. ISBN 82-7385-176-1. 745 s.

- Reinikainen, A., Veijalainen, H. ja Nousiainen, H.** 1998. Puiden ravinnepuutokset - Metsänkasvattajan ravinneopas. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 688.
- Rósen, K., Eriksson, H., Clarholm, M., Lundkvist, H. & Rudebeck, A.** (1993). Granulerad vedaska till skog på fastmark - ekologiska effekter. NUTEK Rapport 1993: 26. 60 s.
- Rühling, Å.** 1996. Upptag av tungmetaller i svamp och bär samt förändringar i florans sammansättning efter tillförsel av aska till skogsmark. IVL/Ekologiska institutionen. Ramprogram askåterföring. Sydkraft - Nutek - Vattenfall. R 1996:49. 42 s.
- Silfverberg, K.** 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland, D. Sc. thesis. University of Helsinki, Faculty of Science. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 588. 27 s.
- Silfverberg, K. & Hotanen, J-P.** 1989. Puuntuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofisella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla. Summary: Long-term effects of wood-ash on a drained mesotrophic *Sphagnum papillosum* fen in Oulu district, Finland. Folia Forestalia 742. 23 s.
- Silfverberg, K. & Huikari, O.** 1985. Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaila. Abstract: Wood-ash fertilization on drained peatlands. Folia Forestalia 633. 25 s.
- Silfverberg, K. & Issakainen, J.** (1991). Tuhkalannoituksen vaikutukset metsämarjoihin. Summary: Effects of ash fertilization on forest berries. Folia Forestalia 769. 23 s.
- Varo, P., Lähelmä, M., Nuurtamo, E., Saari, E. & Koivistoinen, P.** 1980. Mineral element composition of Finnish foods VII. Potato, vegetables, fruits, berries, nuts and mushrooms. Acta Agriculturae Scandinavica, Suppl. 22: 89-113.