



ENERGIAPUUSTA PUUTUHKAKSI

Juha Nurmi, Jyrki Rytönen & Keijo Polet (toim.)

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660

Kannus 1997

Metsäntutkimuslaitos
Kannuksen tutkimusasema
PL 44
69101 Kannus
puh. (06) 874 3211

**Metsäntutkimuslaitos
Kannuksen tutkimusasema
PL 44
69101 Kannus
puh. (06) 874 3211**

**The Finnish Forest Research Institute
Kannus Research Station
PL 44
FIN-69101 Kannus
Finland**



Energiapuusta puutuhkaksi

Toimittaneet

Juha Nurmi, Jyrki Hytönen & Keijo Polet

Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema.
Kannus 1997.

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660

Nurmi, J., Hytönen, J. & Polet, K. (toim). 1997. Energiapuusta puuntuhkaksi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660. 62 s. ISBN 951-40-1590-8, ISSN 0358-4283.

Julkaisun artikkelit perustuvat Metsäntutkimuslaitoksen Kannuksen tutkimusaseman järjestämän tuhkaseminaarin esitelmiin.

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema.

Hyväksynyt: Tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen 11.11.1997.

Jakaja: Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema, PL 44, 69101 Kannus.
Puh. 06 – 874 3211.

SISÄLLYS

Lukijalle: Energiapuun ja puutuhkan käyttö ajankohtaista	4
Pentti Hakkila: Uudet energiapuun korjuumenetelmät	6
Juha Nurmi: Hakkuutähteen polttopuu- ja ravinneominaisuudet	11
Jukka Haapasaari: Tuhka kiinteänpolttoaineen kaukolämpö- ja voimalaitosten näkökulmasta	19
Seppo Kaunisto: Suometsien ravinnetalouden erityispiirteet ja puutuhkan käyttömahdollisuudet	21
Klaus Silfverberg & Anna-Liisa Mertaniemi: Ravinteiden huuhtoutuminen tuhka- lannoitetusta turpeesta	27
Jyrki Hytönen: Pelletoidun tuhkan ja muiden pelletoitujen jäteaineiden vaikutus rauduskoivun taimien alkukehitykseen	35
Jyrki Hytönen & Tero Takalo: Tuhkappellettien kestävyys maastossa ja varastoinnissa	44
Risto Lauhanen, Mikko Moilanen, Klaus Silfverberg, Heikki Takamaa & Jorma Issakainen: Tuhkalannoituksen erilliskannattavuus	51
Sauli Takalo: Tuhka ja jätteet pelleteiksi lieriöpuristimella	59

Lukijalle

Energiapuun ja puutuhkan käyttö ajankohtaista

Suomen energiatarve tyydytettiin aikaisemmin lähes kokonaisuudessaan puuta polttamalla. Juuri ennen toista maailmansotaa puun osuus oli 80 %. Suomessa puu säilyi tärkeimpänä energialähteenä pidempään kuin missään muualla Euroopassa. Sotien jälkeen oli pakko turvautua yhä enemmän tuontienergiaan. Kuitenkin vielä vuonna 1960 puuperäisten polttoaineiden osuus energiantuotannostamme oli 45 %, mutta 1970-luvun puolivälissä enää 15 %.

Bioenergian käytön edistäminen on ollut keskeinen osa Suomen energiapolitiikkaa jo parisenkymmentä vuotta. Nykyisin käytettävästä energiastamme noin 15 % on peräisin puusta ja 5 % turpeesta. Puuenergian etuja ovat uusiutuvuus, kotimaisuus, paikallisuus, työllistyvyys sekä metsien hoidon edistäminen. Metsissämme on mittava uusiutuvan bionenergian reservi. Puun käytön lisääminen energiantuotannossa lisäisi myös syntyviä tuhkamääriä. Puuta ja turvetta poltettaessa syntyy lämpövoimaloissa energian lisäksi tuhkaa. Suurissa voimaloissa arvioidaan syntyvän 250 000 – 300 000 tonnia puutuhkaa sekä yli 100 000 tonnia turvetuhkaa vuodessa.

Tuhka samoin kuin monet muutkin jäteaineet sisältävät ravinteita, joiden palauttaminen (kierrätys) metsään voisi olla sekä metsänkasvatuksellisesti että ekologisesti perusteltua. Tuhkan käytöllä voitaisiin myös ehkäistä maaperän happamoitumista. Tuhka on energialaitoksille jäte, josta suuri osa päätyy läjitysalueille tai kaatopaikoille. Tuhkan hyötykäytöllä vältettäisiin tuhkan kuljetuksesta kaatopaikoille aiheutuvat kustannukset ja vähennettäisiin kaatopaikoille kertyvien jätteiden määrää. Tuhkan palauttamisen ketju myös työllistäisi.

Tuhkan ravinnesisältö

Puubiomassan tuhkapitoisuuden ja tuhkan ravinnepitoisuuksiin vaikuttavat monet tekijät puulajista, kasvu-paikasta, puun osasta, koosta ja iästä, hakkuutavasta, polttotekniikasta ja jälkikäsiteltävasta riippuen. Syntyvä tuhkan laatuun voidaan vaikuttaa lämpölaitoksilla esim. pitämällä eri tuhkalaadut erillään ja varas-toimalla tuhka hyvin.

Biomassan poltossa siihen sitoutunut tyyppi menetetään eikä hyvin palaneessa tuhkassa ole typpeä. Puutuhka sisältää ravinteita samassa suhteessa kuin puut sitä maasta ottavat. Ravinnesisältö onkin tuhkan arvokkain ominaisuus. Tuhkan tärkeimmät ravinteet ovat fosfori ja kalium sekä hivenravinteet, mutta puutuhka sisältää myös runsaasti kalsiumia ja magnesiumia. Puutuhkan pH on useimmiten 12 – 13, ja sen kalkitusvaikutus on usein varsin hyvä. Puutuhkaan verrattuna turpeentuhkassa on vähän ravinteita, erityisesti kaliumia.

Tuhkien ja muiden jäteaineiden hyötykäytön suunnittelua auttaa niiden ravinnepitoisuuksien analysointi. Ravinteiden lisäksi on syytä kiinnittää huomioita myös haitallisten raskasmetallien pitoisuuksiin.

Käyttökohteet

Puutuhka sopii parhaiten metsänlannoitteeksi runsastypillisille soille ja metsitettävillä tai jo metsitetyillä turvemaapelloille. Puutuhkan käyttömääräsuositukset perustuvat tuhkan fosforimääriin. Käytännön tuhkalannoituksessa ojitetuille turvemaille suositellaan 4000 – 8000 kg:n puutuhka-annosta hehtaarille. Kymmenet tuhkalannoituskokeet osoittavat puutuhkan lisäävän puuston kasvua turvemilla 20 – 30 vuoden, eräissä ta-

pauksissa jopa 50 vuoden ajan. Koska tuhka vähentää soilla turpeen happamuutta se parantaa mikrobitoimintaa turpeessa, ja lisää siten edellytyksiä kasveille käyttökelpoisen typen vapautumiselle turpeesta. Sisälämiensä hivenravinteiden vuoksi puutuhka sopii hyvin myös ravinnetaloudeltaan ongelmallisiksi tiedettyjen kohteiden terveyslannoitukseen. Siten, esim. peltojen metsityksessä yleisesti esiintyviä ravinneperäisiä kasvuhäiriöitä voidaan ehkäistä puutuhkan käytöllä. Vaikka kangasmetsissä tuhka ei lisää puuston kasvua, voidaan sitä käyttää maan luontaisen tai ilman saasteiden aiheuttaman happamoitumisen torjuntaan. Hyvän kalkitusvaikutuksen vuoksi puutuhka sopii maanparannusaineeksi myös pelloille, kunhan huolehditaan siitä, ettei sallittuja kadmiumpitoisuuksia ylitetä.

Pelletointi ratkaisu levitysongelmiin?

Tuhkan hyväksi tiedetyistä ominaisuuksista huolimatta sitä ei ole laajamittaisesti käytetty maanparannusaineena ja lannoitteena metsissä. Syitä tähän ovat mm. levitystekniset ongelmat ja melko suuret käyttömäärät. Metsäojitetuilla turvemailla kesäaikaista levitystä rajoittaa soiden huono kantavuus. Lisäksi irtotuhkan kuljetus on tilaa vievää, käsittely likaista eivätkä irtotuhkan levitystarkkuus- ja tasaisuus ole hyviä. Lisäksi tuhkapöly kuluttaa koneiden osia ja voi aiheuttaa levittäjille terveystariskin.

Koska irtotuhkan ja muiden jätteiden levittämisessä on monenlaisia ongelmia, niiden käyttökelpoisuutta voisi parantaa pellettoimalla. Pellettejä voidaan valmistaa tuhkan syntypaikoilla ja niihin voidaan ominaisuuksien parantamiseksi lisätä muita aineita, vaikkapa jätelietteitä tai turkiseläinten lantaa. Pellettejä voidaan varastoida ilman, että ne paakkuuntuisivat ja pellettoitua tuhkaa on helppo levittää maastoon normaaleilla lannoitelevittimillä toisin kuin pölyävää, irtonaista kuivaa tuhkaa. Pellettoitu tuhka leviää hyvin. Suometsissä olisi erittäin runsaasti levityskohteita, joilla puun tuhalla saataisiin aikaan hyvin pitkäaikainen maata parantava ja puuston kasvua lisäävä vaikutus.

Metsäntutkimuslaitoksen Kannuksen tutkimusasemalla energiapuun tuotannon ja puun energiakäytön tutkimus on ollut keskeisellä sijalla aseman alkuajoista lähtien. Energiapuun käyttö ja tuhkan tuotanto kytkeytyvät toisiinsa. Tuhkaseminaarin järjestämistä sekä Kannuksen tutkimusasemalla tehtyä tuhkan pelletointiin ja käyttöön liittyvää tutkimus- ja kehittäelytyötä ovat tukeneet mm. Keski-Pohjanmaan Maaseutuelinkeinopiiri, Keski-Pohjanmaan ympäristökeskus sekä Imatran Voiman Säätö. Useat yritykset ovat myös olleet mukana kehittäelytyössä.

Jyrki Hytönen & Juha Nurmi

Uudet energiapuun korjuumenetelmät

Pentti Hakkila

1. Puuperäisen energian nykykäyttö

Puuperäisellä energialla on Suomessa suurempi merkitys kuin missään muussa teollistuneessa maassa. Kun puun kokonaiskäyttö on noin 55 milj. m³ vuodessa, peräti 26 milj. m³ eli 47 % raaka-aineesta päätyy lopulta muodossa tai toisessa energiakäyttöön:

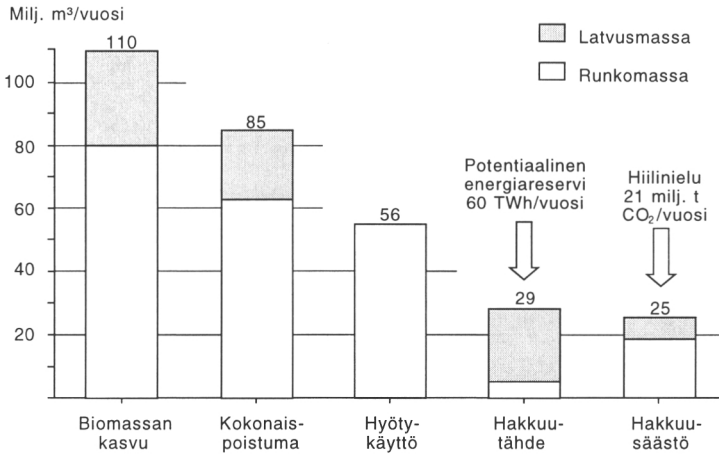
	Puuraaka-aineen loppu- käyttö, milj. m ³ /vuosi
Metsäteollisuuden tuotteisiin:	
Massa ja paperi	20,4
Sahatavara	7,4
Puulevyt	1,2
Yhteensä	29,0
Metsäteollisuuden energiaksi:	
Selluteollisuuden jätelipeä	14,3
Kuurintatähde	5,0
Sahanpuru ym.	1,7
Yhteensä	21,0
Teollisuuspuun kokonaiskäyttö	50,0
Varsinainen polttopuu	5,0
Puun kokonaiskäyttö	55,0

Yli 80 % puuperäisestä energiasta syntyy teollisuudessa passiivisesti prosessitähteenä, niin ettei siihen kohdistu erityistä korjuutoimintaa. Muu energiapuun pääosiltaan halko- ja rankamuotoista polttopuuta, joka käytetään 30—50 cm:n pituisena pilkkeenä maatilataloudessa ja pientaloissa. Vaikka pilkkeen tekoa on rationalisoitu erilaisin traktorikäyttöisin katkaisu- ja halkaisulaittein, on kysymyksessä kuitenkin pohjimmitaan perinteinen teknologia.

Kolmannen energiapuun käyttökohteen muodostavat haketta polttavat lämmitys- ja sähkölaitokset. Niitten hakkeen hankinta pohjautuu uuteen teknologiaan ja pääosin myös uudentyyppiseen raaka-ainepohjaan. Tässä esityksessä, jonka aiheena on uudet energiapuun korjuumenetelmät, rajoitutaankin pienta jätetuusta energiakäyttöön valmistetun metsähakkeen korjuuseen. On syytä huomata, että metsähakkeen käyttö on vielä toistaiseksi melko vaatimattomalla tasolla. Metsäntutkimuslaitoksen ja Puuenergiayhdistyksen selvityksen mukaan metsähaketta poltettiin vuonna 1995 kaikkiaan 102 laitoksessa, kun vähimmäiskäytöksi asetettiin 250 m³ vuodessa. Yhteensä käyttö oli 258 000 m³ eli 645 000 i-m³, mutta sen jälkeen se lienee jonkun verran kasvanut.

2. Metsiemme energiareservi

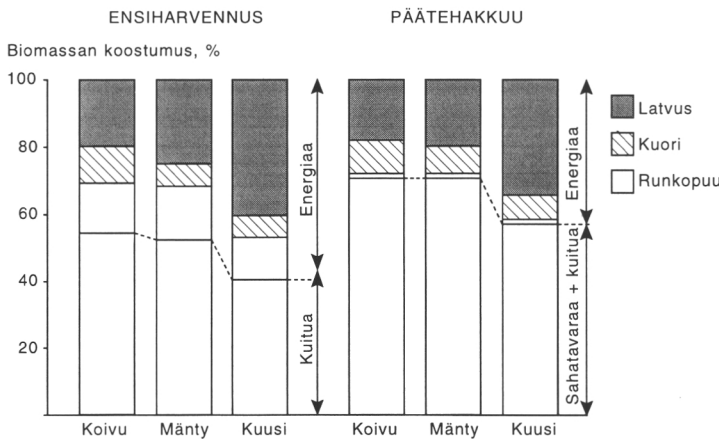
Metsiemme runkopuun kasvu on noin 80 milj. m³. Latvusmassa mukaan luettuna puubiomassan kokonaiskasvu (ilman juurakkoa) on 110 milj. m³ vuodessa. Vuoden 1994 tilannetta edustava kuva 1 osoittaa, että kun kotimaista runkopuuta käytettiin tuolloin 56 milj. m³, hakuissa jäi samalla tähteeksi 29 milj. m³ runko- ja latvusmassaa.



Kuva 1. Puustomme biomassakasvu, poistuma, hyötykäyttö, hakkuutähde ja hakkuusäästö vuonna 1994.

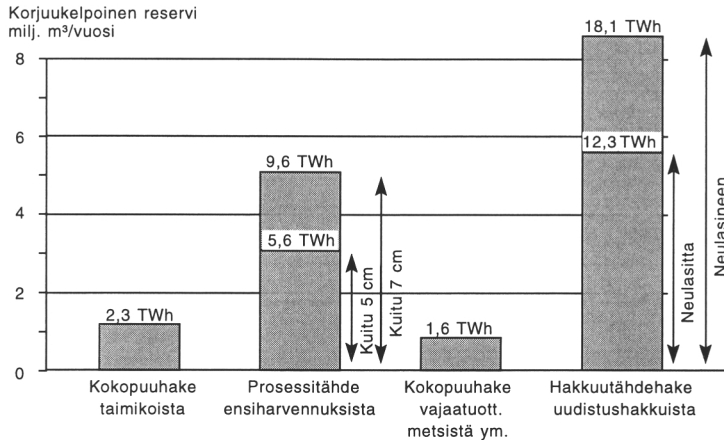
Energiakäyttöön tulisi ohjata vain sellaista puubiomassaa, jota ei voida hyödyntää teollisuuden raaka-aineena. Sitä ovat kuvassa 1 hakkuutähde sekä hakkuusäästöön sisältyvä markkinakelvoton pienpuu, joka tulisi metsänhoidollisista syistä poistaa taimikoista ja muista nuorista metsistä. Latvusmassa näyttelee keskeistä osaa tässä energiareservissämme.

Kuvasta 2 nähdään, että latvusmassaa on suhteellisesti eniten nuorten harvennuskasvien puustossa. Jos kuitenkin tarkastellaan leimikkokohtaisesti vain sitä biomassaositetta, joka ei ole kelpollista teollisuuden raaka-aineeksi mutta on tarjolla energiakäyttöön, niin silloin nimenomaan järeitten päätehakkueleimikoitten energiaosite sisältää suhteellisesti eniten latvusmassaa.



Kuva 2. Ensiharvennusleimikoista ja päätehakkueleimikoista poistettavan biomassan jakautuminen raaka-aine- ja energiaositteisiin.

Monet teknis-taloudelliset ja ekologiset syyt asettavat rajoituksia mittavan energiareservimme hyödyntämiselle. Metsätutkimuslaitoksen laskelmien mukaan markkinakelvottomasta pien- ja jätetuusta koostuva korjuukelpoinen energiareservi on kooltaan 10 – 15 milj. m³ vuodessa. Siitä pääosa koostuu päätehakkueleimikoiden jätetuusta. Loppuosaa saadaan pienpuuleimikoista, joissa merkittävin energiareservi koostuu ensiharvennuskasvien biomassasta, joka ei sovellu teollisuuden raaka-aineeksi (kuva 3).



Kuva 3. Korjuukelpoinen metsäenergiareservimme.

3. Pienpuu runkona vai kokopuuna?

Polttohakkeen valmistus käynnistyi jo 1950-luvulla. Silloin oli raaka-aineena hyvälaatuinen karsittu puu, kun ei ollut käytettävissä karsimattoman puun käsittelyn vaatimia hydraulikuormaimia ja järeitä hakkureita. Mutta nyt metsähakkeen pääasialliset lähteet ovat siis päätehakkuuleimikoitten hakkuutähde sekä nuorten metsien pienpuu, joka voidaan ottaa talteen joko karsittuna rankana tai karsimattomana kokopuuna.

Kustannusten alentamiseksi on alettu luopua polttohakepuun karsimisesta, jolloin perinteisen rankahakkeen sijaan tehdään kokopuuuhaketta. Tämän muutoksen seurauksena

- hakkeen kertymä paisuu 20 – 35 %
- tuotantokustannukset alenevat 25 – 40 %
- siirrytään käyttämään tehokkaampaa kalustoa
- joudutaan kiinnittämään entistä tarkempaa huomiota hakkeen palakoon tasaisuuteen
- hakkeen säilyvyys heikentyy viheraineen mukaantulon johdosta
- hakkeen hankinnan tarjoamien työpaikkojen määrä jää 30 – 40% pienemmäksi
- metsämaan ravinnetappiot kasvavat 30 – 100%
- poltossa syntyvän tuhkan määrä kasvaa vastaavasti

Rankahaketukseen verrattuna kokopuuuhaketukseen liittyy siis eräitä epätoivottuja seuraamuksia. Kustannussäästö on kuitenkin niitäkin ratkaisevampi, sillä ilman sitä pienpuusta tehty hake on aivan liian kallista mahdollistaakseen käytön moninkertaistumisen. Lämmityslaitosten polttamasta metsähakkeesta tehtiin tosin vielä vuonna 1995 neljäsosa karsitusta rangasta.

4. Korjuun vaihtoehdot

Energiapuun talteenotto ei ole muusta metsätaloudesta irrallinen tapahtuma, vaan se tulee integroida yleiseen metsätalouden suunnitteluun ja puunkorjuuseen. Menetelmät ja kalusto riippuvat toiminnan mittakaavasta ja jatkuvuudesta. Kustannustehokkuus edellyttää, että työvoima ja konekalusto toimivat täystyöllistettyinä, mutta tähän ei nykyisellä vaatimattomalla käyttötasolla juurikaan vielä päästä.

Metsähakkeen tuotannon tärkeimmät vaihtoehdot ovat pienpuun kokopuuhaketus, kuitu- ja energiapuun integroitu talteenotto sekä hakkuutähteen haketus. Yleisimmin turvaudutaan seuraaviin ratkaisuihin:

Pienpuun kokopuuhaketus

- Haketus palstalla
- Haketus välivarastolla

Kuitu- ja energiapuun integroitu korjuu

- Kuitu- ja energiaositteiden erottaminen ennen haketusta
- Kuitu- ja energiaositteiden erottaminen haketuksen jälkeen

Hakkuutähteen haketus

- Haketus palstalla
- Haketus välivarastolla
- Haketus käyttöpaikalla (kuljetus irtotavarana tai paaleina)

Kuten edellä on osoitettu, energiakäyttöön ohjautuva metsähake sisältää runsaasti latvusmassaa. Erityisesti kuusella se merkitsee suurta neulasosuutta, mikä puolestaan merkitsee perinteiseen polttopuuhun verrattuna korkeaa tuhkapitoisuutta. Seuraava lukusarja antaa kuvan puhtaan tuhkan määrästä erilaisista raaka-aineista tehdyssä metsähakkeessa:

	Puhdasta tuhkaa, kg/m ³
Ranka	3
Kokopuu lehdittä	4
Kokopuu lehtineen	5
Kuusen latvusmassa lehdittä	9
Kuusen latvusmassa lehtineen	13

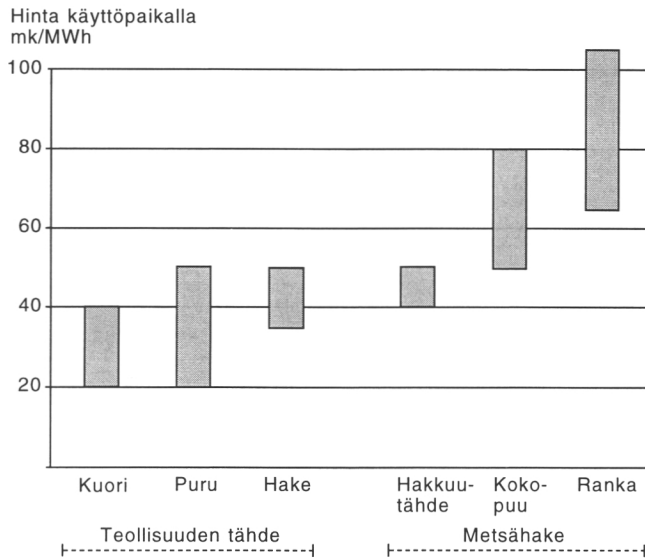
5. Metsähakkeen tuotantokustannukset

Vain pieni osa energiapuusta joutuu käytännössä kaupan piiriin niin, että sille määräytyy tuotantokustannuksiin perustuva hinta. Kustannusten muodostuminen riippuu monista tekijöistä:

- Raaka-aineen laatu ja lämpöarvo
- Leimikkotekijät
- Kuljetusetäisyydet
- Toiminnan mittakaava ja jatkuvuus
- Hankintaorganisaation tehokkuus ja logistiikan toimivuus

Muusta energiapuusta poiketen metsähake on tyypillisesti kaupallinen tuote. Puuenergiayhdistys ry:n ja Metsäntutkimuslaitoksen kyselytutkimuksessa saatiin vuoden 1995 keskimääräiset hintatiedot 50 metsähaketta käyttävältä lämmityslaitokselta, joilta tiedusteltiin hakkeesta, purusta ja kuoresta käyttöpaikalla maksettua arvonlisäverotonta hintaa. Laitoskyselyn tulokset nähdään kuvasta 4. Polttoainelajien väliset erot ovat hyvin merkittäviä, ja myös lajien sisäinen vaihtelu on laaja.

Metsäteollisuuden prosessitähde on kustannuksiltaan edullisempaa polttoainetta kuin metsähake. Halvimpia ovat kuorintatähde ja puru. Kuorimattomista sahauspinnoista ja puusepänteollisuuden prosessitähdeestä tehty hake on jo kalliimpaa. Sen kanssa lähes samalle kustannustasolle yltää myös hakkuutähdehake. Pienpuusta tehdyn hakkeen kustannukset ovat oleellisesti korkeammat, aivan erityisesti jos hake tehdään karsituista rangoista.



Kuva 4. Lämmityslaitosten puupolttoaineista vuonna 1995 maksama arvonlisäveroton hinta.

Kun lähes kaikki metsäteollisuudessa syntyvä prosessitähde on jo hyötykäytön piirissä, puun käytön laajenemisen on lämmitys- ja voimalaitoksilla pohjaututtava metsähakkeeseen. Koska hakkuutähde on kustannuksiltaan kokopuuhaketta edullisempaa ja sen raaka-ainepohja on laeva, käytön kasvu tultaneen ainakin suuremmilla laitoksilla tyydyttämään ensisijaisesti hakkuutähdehakkeella, jonka polttoon liittyy runsas tuhkan tuotanto.

6. Mitä 10 milj. m³:n lisäkäyttö merkitsisi?

Valtiohallan tavoitteena on lisätä uusiutuvan energian käyttöä. Lähinnä on kysymyksessä puuperäinen energia, jolloin talteenotettavissa siis on kuvan 3 mukainen biomassareservi. Metsähakkeen käytön kasvun kolmikymmenkertaistuminen 10 milj. m³:iin johtaisi laajakantoisiin ja myönteisiin seurauksiin erityisesti maaseudun näkökulmasta:

- Fossiilipolttoaineitten käyttöä voitaisiin supistaa noin 2 milj. öljytonnia vastaavalla määrällä vuodessa. Maaseudulla tuotettaisiin metsähaketta 700—800 milj. mk:n arvosta.
- Työpaikkoja syntyisi välittömästi 5000 ja välillisine kerrannaisvaikutuksineen 11 000.
- Suomen hiilidioksidipäästöt vähenisivät vuoden 2010 ennustetasolla 8 %, mikä auttaisi Suomea pitämään kiinni kansainvälisistä sitoumuksistaan.
- Nuoria metsiä tulisi hoidetuksi energiapuun korjuun yhteydessä 100 000 ha vuodessa.
- Puubiomassasta syntyvän puhtaan tuhkan vuosituotanto kasvaisi 100 000 tonnilla, ja tuhka tulisi palauttaa luonnon kiertoon.

Kirjallisuus

Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.

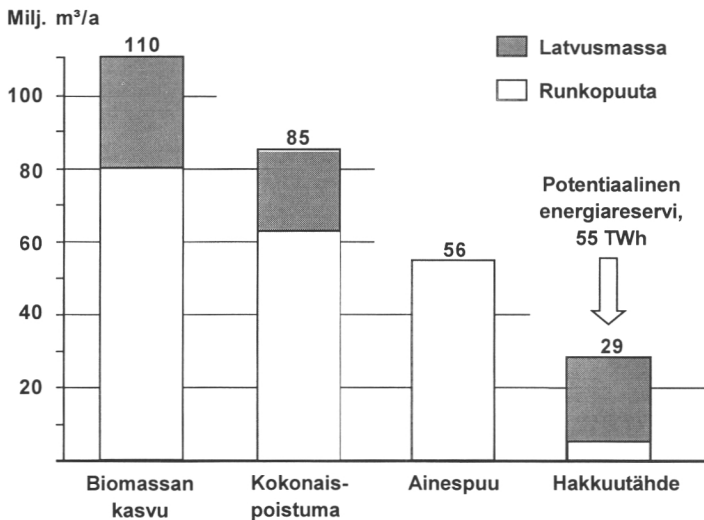
Hakkuutähteen polttopuu- ja ravinneominaisuudet

Juha Nurmi

1. Johdanto

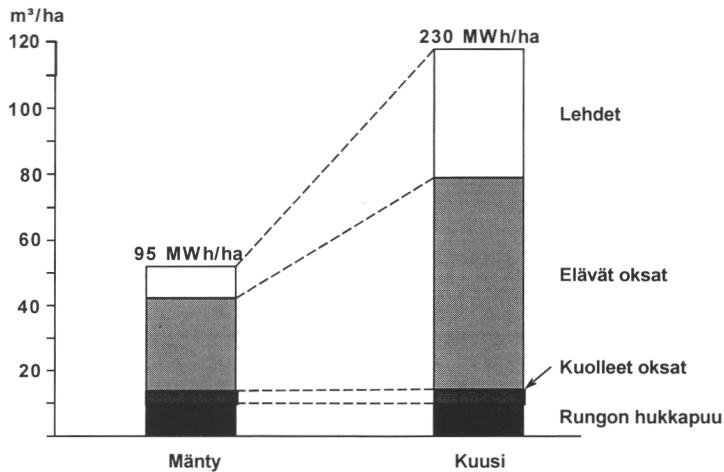
Hakkuutähte on yksi suurimmista käyttämättömistä biomassareserveistämme. Ainespuun korjuun yhteydessä sitä jää metsiin vuosittain noin 29 Mm^3 , mikä energiasisällöltään vastaa 55 Twh (kuva 1). Hakkuutähteen hyödyntämistä harkittaessa on kuitenkin otettava huomioon sen korjuusta puun kasvulle ja ympäristölle aiheutuvat haitat. Onkin arvioitu, että ekologiset, tekniset ja taloudelliset syyt rajoittavat korjuukelpoisen hakkuutähteen määrän noin $8,6 \text{ Mm}^3$:iin vuodessa (Hakkila ja Fredriksson 1996).

Hakkuutähteellä tarkoitetaan tässä yhteydessä oksia neulasineen, sekä rungon ainespuuksi kelpaamattomia osia. Hakkuutähteen kertymä on suurin uudistuskypsissä metsissä. Hakkuutähteen määrä rungon biomassasta laskettuna on männyllä 21 %, kuusella 54 % ja koivulla 16 % (Hakkila 1991). Lisäksi 2 – 5 % rungosta päätyy hakkuutähteeksi. Tyypillisen päätehakkuumännikön ja -kuusikon hakkuutähteen määrä ja koostumus on nähtävissä kuvasta 2. Kuusikoissahakkuutähteen määrä on runsaasta elävästä latvuksesta johtuen paljon männiköitä suurempi. Männiköitä ei kuitenkaan tule väheksyä, sillä niistä saatavan hakkuutähteen määrä on suurempi kuin esimerkiksi raivauspuustojen kertymät tai ensiharvennusmänniköistä saatava energiajakeen määrä.



Kuva 1. Biomassan kasvu ja poistuma Suomen metsissä vuonna 1994 (Hakkila & Fredriksson 1996).

Biopolttoaineitten korjuun eräs vaikeimmista vaiheista on polttoaineen laadun hallinta. Aikaisempien tutkimusten perusteella tiedämme, että haketun, murskatun tai muilla keinoin pienitty biomassan pitkittynyt varastointi aiheuttaa huomattavia kuiva-ainetappioita, energiasisällön alenemista sekä terveysriskejä käyttäjien keskuudessa (Bergman and Nilson 1967, Gislrud 1974, Thörnqvist 1987, Nurmi 1990, Thörnqvist and Jirjis 1990). Ankarasta ilmastosta johtuen välivarastojen käyttö on kuitenkin välttämätöntä polttoaineen jatkuvan saatavuuden turvaamiseksi. Vaikeutena onkin löytää oikeat polttoaineen korjuun ja käsittelyn ajankohdat.



Kuva 2. Hakkuutähteen määrä männiköissä ja kuusikoissa kun ainespuun poistuma on 200 m³/ha (Hakkila & Fredriksson 1996).

2. Hakkuutähteen kosteus

Tuoreen ja varastoidun puun kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan (Hakkila 1962, Thörnqvist 1984). Tuoreen hakkuutähteen kosteus on yli 50 %. Mikäli tuoreet tähteet jätetään palstalle harvesterin jättämiin kasoihin talven yli, kertyy niihin runsaasti lunta ja jäätä, mikä kohottaa kosteuden yli 60 %:n. Mikäli hakkuutähteen sallitaan kuivua palstalla kesän yli putoaa kosteus alle 30 % (taulukko 1). Varastoitaessa tuoretta hakkuutähdettä suurissa kasoissa palstatiin varressa kosteus ei laske kesän aikana yhtä alas kuin palstalla. Toisaalta tähteet eivät myöskään kasu talvella yhtä pahoin.

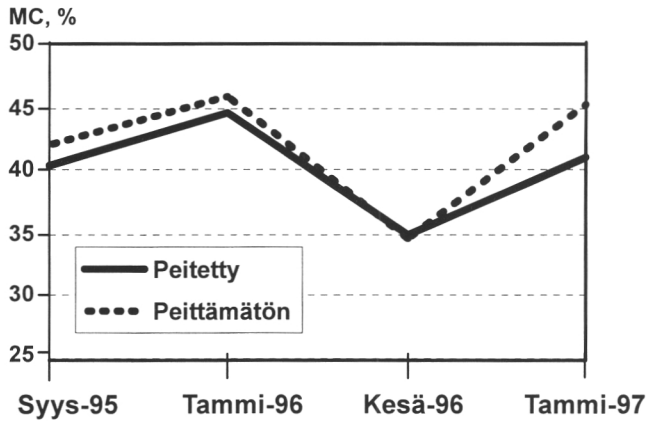
Taulukko 1. Hakkuutähteen kosteus eri varastoissa eri aikoina.

Varasto	Näytteenotto pvm			
	Syys-94	Maalis -95	Kesä -95	Syys -95
Palsta	56.0	61.4	46.7	28.5
Välivarasto	56.0	42.2
Tehdas/murske	58.9	..	65.3	..

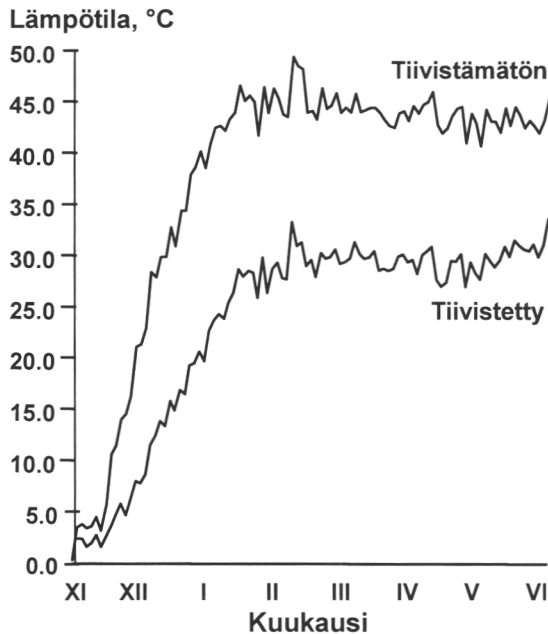
Ruotsissa hakkuutähteen pitkäaikainen varastointi välivarastossa on yleinen käytäntö jolla pyritään parantamaan hakkuutähteestä saatavan polttoaineen laatua. Olosuhteiden parantamiseksi hakkuutähdikasat peitetään kaksinkertaisella voimaperillä jonka kestävyyttä on parannettu piki ja lasikuitukudos kerroksilla. Tutkimusten mukaan menettely alentaa hakkuutähteen kosteutta huomattavasti (Jirjis 1996). Metsäntruktisuuslaitoksen tutkimuksista saadut tulokset eivät kuitenkaan johda samaan tulkintaan ruotsalaisten tutkimusten kanssa. Kuvasta 3 nähdään välivarastoidun hakkuutähteen kosteuden vaihtelevan vuodenajan mukaan, mutta kasojen kattamisella ei näytä olevan vaikutusta kosteuteen. Selitys tulosten erilaisuudesta tutkimusten välillä johtunee hakkuutähteen erilaisesta kasauksesta. Määräävä tekijä lienee kasan korkeus, mikä on ollut Metsäntutkimuslaitoksen tutkimuksissa suurempi kuin vastaavissa Ruotsalaisissa tutkimuksissa.

Onkin luultavaa, että kasan kattaminen voidaan korvata kasaan korkeutta lisäämällä ja samalla säästetään kustannuksia.

Tuoreen biomassan varastointi hakettuna tai murskattuna luo hyvät olosuhteet mikrobitoiminnalle. Ensimmäinen merkki mikrobitoiminnasta on kasan lämpötilan kohoaminen (Bergman and Nilson 1967, Gislerud 1974, Thörnqvist 1987, Nurmi 1990). Hakkutähdeaumassa lämpötila nousee hyvin nopeasti ensimmäisen varastointiviikon jälkeen. Kuvasta 4 kuitenkin nähdään, että murskeen hyvä tiivistäminen vähentää mikrobitoimintaa so. kuiva-ainetappioita alentaen lämpötilaa 15 °C.



Kuva 3. Hakkutähdeaurteen kosteus muuttuminen ajan suhteen katetuissa ja kattamattomissa kasoissa.



Kuva 4. Tiivistetyn ja tiivistämättömän murskeaurteen lämpötilat ajan suhteen.

Huomattavien kuiva-ainetappioiden lisäksi aineenvaihdunnassa syntynyt vesi lisää kosteutta alentaen entistään polttoaineen tehollista lämpöarvoa. Metsäntutkimuslaitoksen Enson Heinolan vaneritehtaalla tekemässä tutkimuksessa hakkuutähdemurskeen kosteus kohosi hakkuuta seuranneeseen kesäkuun mennessä 65,3 %:iin, jolloin koe keskeytettiin materiaalin pilaantumisen vuoksi (taulukko 1). Murskeen tiivistämisellä ei ollut vaikutusta kosteuteen. Näin kostean polttoaineen tehollinen lämpöarvo on hyvin alhainen mikä tekee siitä monille pienille, savukaasujen lauhdutusjärjestelmää vailla oleville lämpölaitoksille sopimattoman polttoaineen.

3. Hakkuutähteen neulasmassa

Neulasmassan osuus kuusen hakkuutähteestä on hyvin merkittävä. Uudistuskypsässä kuusikossa elävän latvuksen kuivamassasta neulasten osuus on 37 % (Hakkila 1991) ja hakkuutähteestä 25 – 30 % (Nurmi 1997a). Mihin ravinteikas neulasmassa hakkuutähteen korjuun yhteydessä päätyy riippuu valitusta korjuuketjusta. Mikäli neulasten variseminen palstalle esimerkiksi maaperän ravinnesyistä on toivottua tulee tähteet varastoida kesän yli palstalla. Lisäetuna palstalla varastoinnista on hakkuutähteen kuivuminen ja korkeampi tehollinen lämpöarvo. Haittapuolena on kuitenkin pidettävä noin 20 %:lla alentunutta kertymää. Suurin kertymä saadaankin, mikäli hakkuutähteet kerätään tuoreina. Välivarastoinnissakin syntyy neulashukkaa, mutta se ei ole niin merkittävä kuin palstavarastoinnissa. Yhä yleisimmiksi tulevat savukaasujen lauhdutusjärjestelmät mahdollistavat myös tehokkaan tuoreen biomassan polton. Näin saadaan talteen mahdollisimman suuri kertymä ja koko biomassan sisältämä energia. Korjuuvaihtoehdon valinta riippuu maanomistajan ja polttoaineen ostajan tarpeista. Esimerkki hakkuutähteen neulasosuuden muuttumisesta nähdään taulukossa 2.

Taulukko 2. Neulasten osuus hakkuutähteestä (%) palstalla ja välivarastolla.

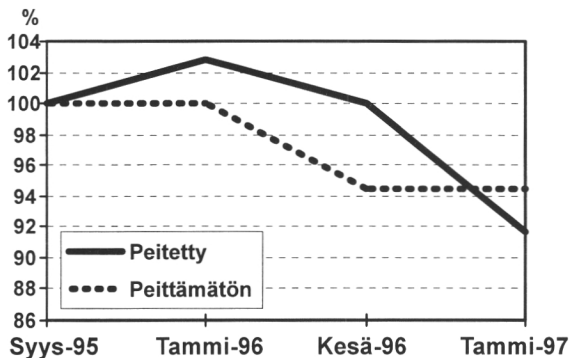
Varasto	Näytteenotto pvm		
	Syys.-94	Kesä -95	Syys -95
Palsta	27.7	20.4	6.9
Välivarasto	27.7	..	18.9

Neulasten varisemisen lisäksi tapahtuu neulasissa kuten myös puu- ja kuoriosissa mikrobitoinnin aiheuttamia kuiva-ainetappioita. Tämä voidaan nähdä myös neulasten suhteellisen massan alenemisena (kuva 5). Vastaava havainto on tehty aiemmin varastoitaessa hakkuutähdettä palstalla ja välivarastossa (Nurmi 1997). Välivarastoinnissa nämä tappiot ovat melko vaatimattomat, mutta palstalla niinkin suuret kuin 20 %. Biomassan hajoamista aikaansaavien bakteerien ja sienten elinolosuhteet lienevätkin palstalla välivarastoa paremmat.

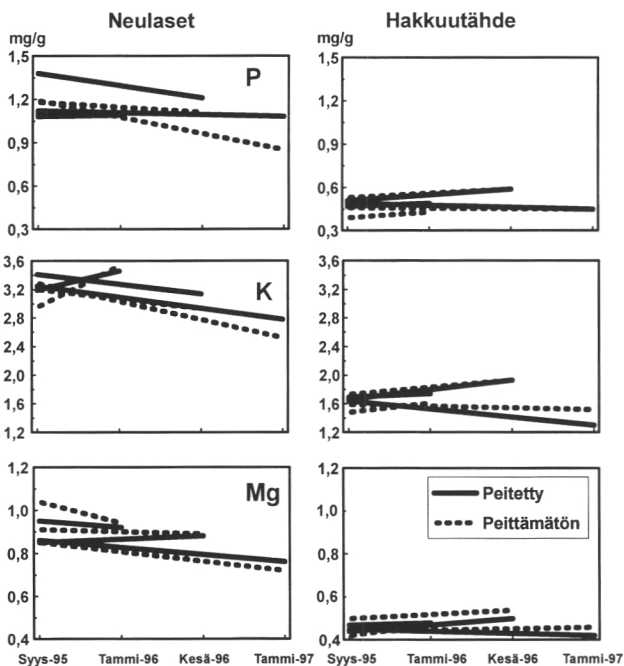
4. Varastoinnin vaikutus hakkuutähteen ravinnepitoisuuksiin

Korkean neulaspitoisuuden lisäksi kuusen neulasat sisältävät suurimman osan hakkuutähteen ravinteista. Joidenkin ravinteiden kohdalla itseasiassa näyttää siltä, että niiden pitoisuudet (K, Ca) neulasissa kohoavat varastoinnin alussa. Vaikka nimenomaan kaliumia pidetäänkin helposti liukenevana ravinteena, näyttäisi siltä että fosfori (P) ja magnesiumi (Mg) vapautuisivat hakkuutähteestä välivarastoinnin aikana sitä helpommin (kuvat 6a ja 6b). Tämä selittäisi miksi kaliumin konsentraatiot aluksi kohoavat. Samansuuntaisen havainnon ovat tehneet aiemmin Granhall ja Slapokas (1984). Raskaammat alkuaineet (Fe, Zn, S, Al) vapautuvat hyvin hitaasti, joten niiden osuus kuivamassasta lisääntyy varastoinnin pitkittyessä. Poikkeuksen

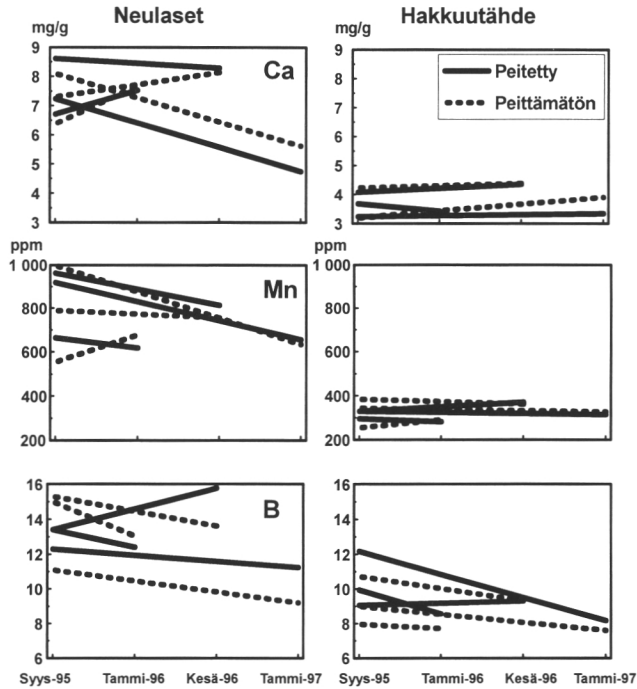
tähän kuitenkin muodostaa kupari joka alhaisesta konsentraatiostaan huolimatta vapautuu helposti (liite 1 ja 2). Natriumin oletetaan olevan osavastuussa polttolaitosten korroosio ongelmista. Neulasista sitä löytyykin pieninä pitoisuuksina (17 – 34 ppm). Varastoinnin vaikutuksesta hakkuutähteen natrium pitoisuuksiin tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan saatu selvyttä. Kadmiumin ja molybdeenin pitoisuudet olivat niin neulasissa niin pienet, ettei niiden pitoisuuksien muuttumisesta myöskään voitu sanoa mitään.



Kuva 5. Kuusen neulasten suhteellinen massa varastointiajan funktiona.



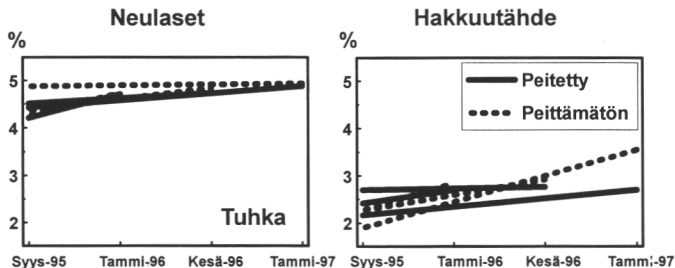
Kuva 6a. Neulasten ja hakkuutähteen fosfori, kalium ja magnesium pitoisuudet mg/g varastointiajan funktiona.



Kuva 6b. Neulasten ja hakkuutähteen kalsium (mg/g), mangaani ja boori (ppm) pitoisuudet varastointiajan funktiona.

5. Hakkuutähteen tuhkapitoisuus

Biomassan pääraakennusaineet, hiili, vety ja typpi palavat tullessaan kosketuksiin hapen ja korkean lämpötilan kanssa. Tuhka muodostuukin palamattomista alkuaineista. Kuusen rungon ja oksien puuaineen tuhkapitoisuus vaihtelee välillä 0,30 – 0,63 % kuivamassasta. Kuorta sisältävän oksamassan tuhkapitoisuus on 1,88 %. Kuoren tuhkapitoisuus on 3 %. Neulasten tuhkapitoisuus on tätäkin korkeampi. Lähteestä riipuen se vaihtelee välillä 4,20 – 5,13 % (Hakkila & Kalaja 1983, Voipio & Laakso 1992). Tässä tutkimuksessa neulasten tuhkapitoisuus vaihteli välillä 4,2 – 4,9 %. Hakkuutähteen tuhkapitoisuuden ollessa 2 – 2,5 %. Varastoinnin pidentyessä niin neulasten kuin hakkuutähteenkin tuhkapitoisuus lisääntyi (kuva 7), mikä johtuu hiilihydraattien vapautumisesta (Kramer & Kozłowski 1979).



Kuva 7. Kuusen neulasten ja hakkuutähteen tuhkapitoisuus varastointiajan funktiona.

6. Päätelmät

Hakkuutähteen korjuu kuusen päätehakkuualoilta on tekniseltä kannalta helposti toteutettavissa. Hakkuutähteestä saatavan puupolttoaineen laadun parantaminen säilytystä ja kuivatusta säätelemällä ei kuitenkaan ole kovin yksiselitteistä. Voidaan kuitenkin päätellä, että palsta on hakkuutähteen kuivumisen kannalta väli-varastoa parempi paikka. Hakkuutähdettä ei kuitenkaan tule korjata talvella lumen ja jään mukanaan tuoman lisäkosteuden vuoksi. Palstalla varastoitaessa hakkuutähteestä vapautuvat ravinteet päätyvät suuremmissa määrin seuraavan puusukupolven käyttöön kuin väli-varastoinnissa. Mikäli tavoitteena on kuitenkin saada talteen mahdollisimman suuri osa hakkuutähteistä, on tähteet kerättävä tuoreena joko väli-varastoon tai suoraan polttoon. Tuoreesta hakkuutähteestä kuitenkin puolet on vettä, mikä lisää kuljetuskustannuksia. Lisäksi tuoreen hakkuutähdihakkeen varastointi tulee pitää mahdollisimman lyhyenä kuiva-ainetappioiden välttämiseksi.

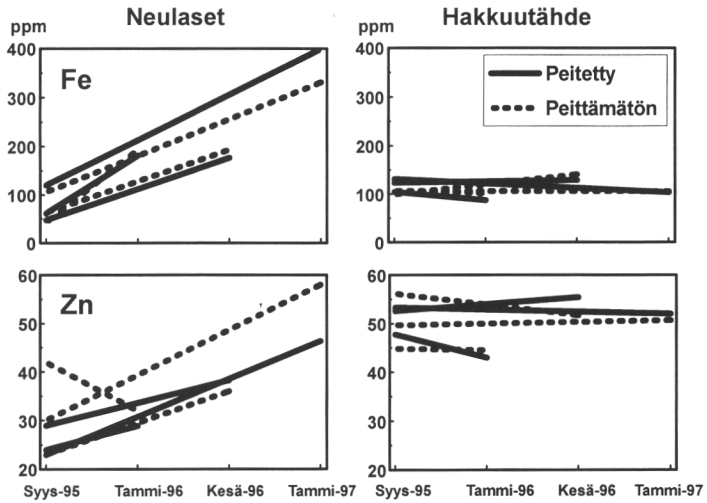
Varastoinnin alkuvaiheessa fosforin, magnesiumin, mangaanin ja boorin vapautuminen alkaa heti. Varastoinnin pitkittyessä myös kaliumia ja kalsiumia vapautuu. Ravinteiden vapautuminen on kuitenkin hakkuutähteestä väli-varastolla hidasta, eikä niiden suurta huuhtoutumista pintavesiin ole odotettavissa. Raskasmetallin pitoisuudet olivat niin pienet, ettei varastoinnin vaikutuksesta niiden pitoisuuksiin voitu tehdä johtopäätöksiä.

Kirjallisuus

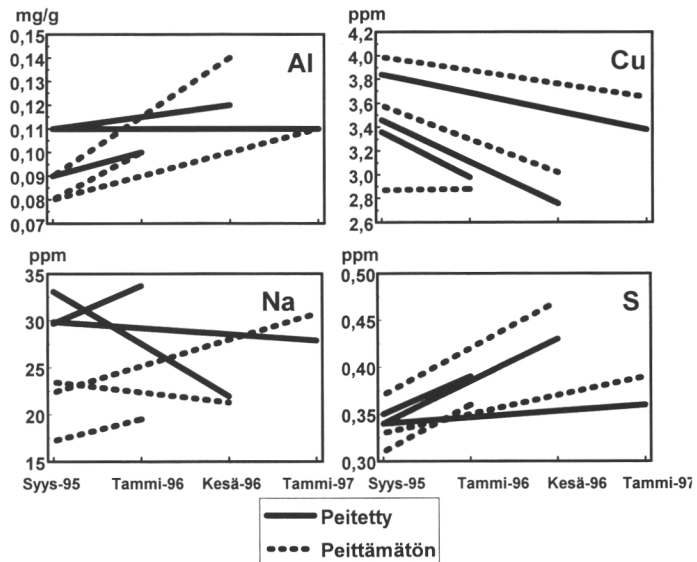
- Bergman, Ö. & Nilson, T. 1967. Studier över utomhuslagring av aspedsfelis vid Hörnefors Sulfitfabrik. Institutionen för Virkeslära, Skogshögskolan. Rapporter 55. 105 s.
- Gislerud, O. 1974. Heltreutnyttelse. Lagring av heltreflis. Summary: Whole tree utilization. Storing of whole tree chips. Norsk Institutt for Skogforskning. Raport 5. 29 s.
- Granhall, U. and Slapokas, T. 1984 Leaf litter decomposition in energy forestry. First year nutrient release and weight loss in relation to the chemical composition of different litter types. In: Perttu, K. (ed). Ecology and management of forest biomass production systems. Dept. Ecol. & Environ. Res., Swedish University of Agricultural Sciences. Report 15, 131–153.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. Summary: Forest seasoning of wood intended for fuel chips. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 54(4). 82 s.
- 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Summary: Crown mass of trees at the harvesting phase. Folia Forestalia 773. 24 s.
- & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuoriturha palauttamisen tekniikka. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. Folia Forestalia 552. 37 s.
- Jirjis, R. 1996. Handling and storage of uncomminuted forest residues. Teoksessa: Hudson, J.B. & Kofman, P.D. (Eds.) 1996. Harvesting, storage and road transportation of logging residues. Proceedings of a workshop of IEA-BA-Task XII activity 1.2, held in October 1995 in Glasgow, Scotland – Danish Forest and Landscape Research Institute, Hørsholm, Denmark, 83 s.
- Kramer, P.J. & Kozlowsky, T.T. 1979. Physiology of wood plants. Academic Press. 811 s.
- Nurmi, J. 1990. Polttohakkeen varastointi suurissa aumoissa. Summary: Longterm storage of fuel chips in large piles. Folia Forestalia 767. 18 s.
- 1993. Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.
- 1997a. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus päätehakkuukuusikoissa. Käsikirjoitus Folia Forestalia-sarjaan.
- 1997b. The storage of logging residue for fuel. Biomass and Bioenergy. Submitted 12 s.
- Thörnqvist, T. 1987. Bränder i stackar med sönderdelat träbränsle. Summary: Spontaneous combustion in piles with comminuted wood fuel. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Vikeslära. Uppsatser 163.

- & Jirjis, R. 1990. Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar. Summary: Changes in fuel chips during storage in large piles. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Virkeslära, Rapport 219. 49 s.
- Voipio, R. & Laakso, T. 1992 Pienikokoisten puiden maanpäällisen biomassan kemiallinen koostumus. Summary: Chemical composition of the above ground biomass of small-sized trees. Folia Forestalia 789. 22 s.

Liite 1. Raudan ja sinkin pitoisuudet (ppm) varastointiajan funktiona.



Liite 2. Alumiinin(mg/g), kuparin natriumin ja rikin (ppm) pitoisuudet hakkuutähteessä ajan funktiona.



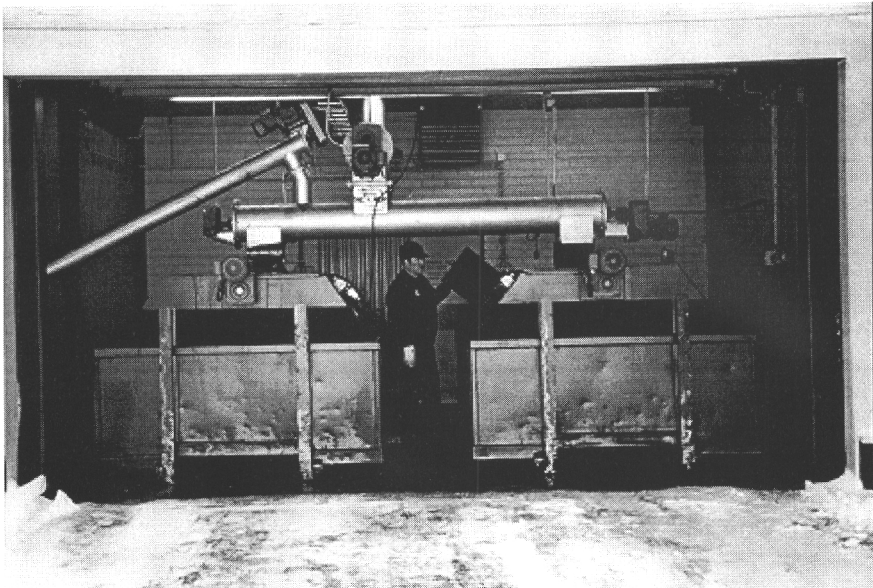
Tuhka kiinteänpolttoaineen kaukolämpö- ja voimalaitosten kannalta

Jukka Haapasaari

Tuhka on polttoaineeseen sitoutunutta palamatonta tai erittäin heikosti palavaa kiinteää materiaalia. Kattilan tulipesässä polttoaineen palamattomat alkuaineet erottuvat tuhaksi palamisprosessin seurauksena. Kevyet tuhkajakeet poistuvat kattilasta välittömästi savukaasujen mukana ns lentotuhkana. Nykyisen yleisesti käytössä olevissa leijupetikattiloissa tuhkan raskaimmat jakeet jäävät leijutushiekan sekaan, missä ne jakautuvat ”hiekkapuhalluksessa” pienimmiksi niin kauan, että jakeet lähtevät leijumaan savukaasujen mukaan, tämän takia kaikki leijupetikattiloista tuleva tuhka on erittäin hienojakoista. Arinakattiloista tuhkan raskaimmat jakeet poistuvat ns arinatuhkana kattilan alaosasta. Arinatuhka on yleensä isorakeista ja osin sintraantunutta erittäin vaikeasti jatkojalostettavaa materiaalia.

Polttoaineiden sisältämät tuhkamäärät :

Polttoaine	Tarve toimituskosteudessa kg/MWh	Tuhka kg/MWh	Tuhka % kuiva-aineessa
Hake	300	1	0,5
Puru	450	1,5	0,5
Kuori	600	7	3
Turve	300	6	3,5



Kuva 1. Kannuksen Kaukolämpölaitoksella tuhka poistuu puhdistuslaitteistosta tuhkakuljettimen avulla tuhkasäiliöille, joilla tuhka kuljetetaan loppusijoituspaikkaan. (Kuva: Esa Heino).

Kaukolämpö- ja voimalaitokset joutuvat ympäristömääräyksien takia erottamaan tuhkapartikkelit savukaasuista ennen savukaasujen ulkoilmaan pääsyä. Tuhkapartikkelit erotetaan savukaasuista yleisimmän sähkösuodattimen avulla. Savukaasujen lämpötila suodatusvaiheessa on selvästi yli 100 astetta, minkä vuoksi erottuva tuhka on täysin kuivaa ja hienojakoisuuden takia erittäin pölyävää. Tuhka poistuu puhdistuslaitteistosta tuhkakuljettimen avulla tuhkasäiliöille, joilla tuhka kuljetetaan loppusijoituspaikkaan joko hyötykäyttöön tai kaatopaikalle (kuva 1).

Tuhkan vieminen kaatopaikalle aiheuttaa laitoksille seuraavia kustannuksia:

- kuljetuskustannukset
- kaatopaikkamaksut
- tulevaisuudessa mahdollinen jätevero

Lentotuhka on polttoprosessin jälkeen steriiliä, homogeenista ja erittäin hienojakoista. Laitoksille olisi helppo rakentaa esim. tuhkan pelletointilaitteisto, koska tuhkaa liikutetaan jo nyt pääsääntöisesti tietokoneiden ohjaamina kuljettimissa. Mahdollinen lisätövoiman ja lisätilan tarve muodostuu kuitenkin ongelmaksi.

Kustannusten minimoimiseksi ovat sekä kaukolämpö- että voimalaitokset erittäin kiinnostuneita tuhkan jatkojalostusmahdollisuudesta. Niiden kannalta olisi todennäköisesti hyvin toimiva sellainen malli, jossa erillinen yritys hoitaisi koko tuhkan jatkojalostuksen.

Suometsien ravinnetalouden erityispiirteet ja puuntuhkan käyttömahdollisuudet

Seppo Kaunisto

1. Johdanto

Metsänparannustoimenpiteet ovat lisänneet puuston kasvua turvemaidella 1930-luvulta lähtien kiihtyvällä vauhdilla. Ennen VMI 3 arvioitiin kasvun lisäyksen olleen 2 miljoonaa m³/v. Seitsemännessä inventoinnissa arvio oli 7 ja kahdeksannessa inventoinnissa jo 10 miljoonaa m³/v. Nykyhetken kantohintojen mukaan kasvun lisäyksen arvo on 1 – 1,5 mrd mk/v ja koko suopuustojen kasvun (17,8 milj m³) arvo 1,8 – 2,7 mrd mk/v. Kahdeksannessa inventoinnissa suometsien keskimääräinen kasvu ylitti kangasmetsien keskimääräisen kasvun. Kasvun lisäys ojjittamattomaan tilanteeseen verrattuna vastaa n. 13 % koko metsiemme kasvusta. Koko metsänparannustoiminnan on arvioitu lisänneen puun määrää yhteensä yli 300 milj. m³ 1930-luvulta lähtien. 1960-luvulla alkaneen lannoitustoiminnan osuus kasvunlisäyksestä on 50 – 60 milj. m³.

Metsänparannustoiminnalla turvemaidella saavutetun puuston kasvun säilyminen nykyisellään ei kuitenkaan ole ongelmatonta. Se riippuu riittävän kuivatuksen lisäksi olennaisesti kasvupaikan ravinnetaloudesta. Mikäli puiden tasapainoisesta ravinnetilasta ei huolehdi, osa tämän hetken vuotuisesta kasvun lisäyksestä tullaan menettämään. Tästä huolimatta lannoitustoiminta on loppunut lähes tyystin. Viime vuosina elpynyt puuntuhkan käyttö metsän lannoitteena näyttää avaavan uuden mahdollisuuden tavanomaisen lannoituksen rinnalle.

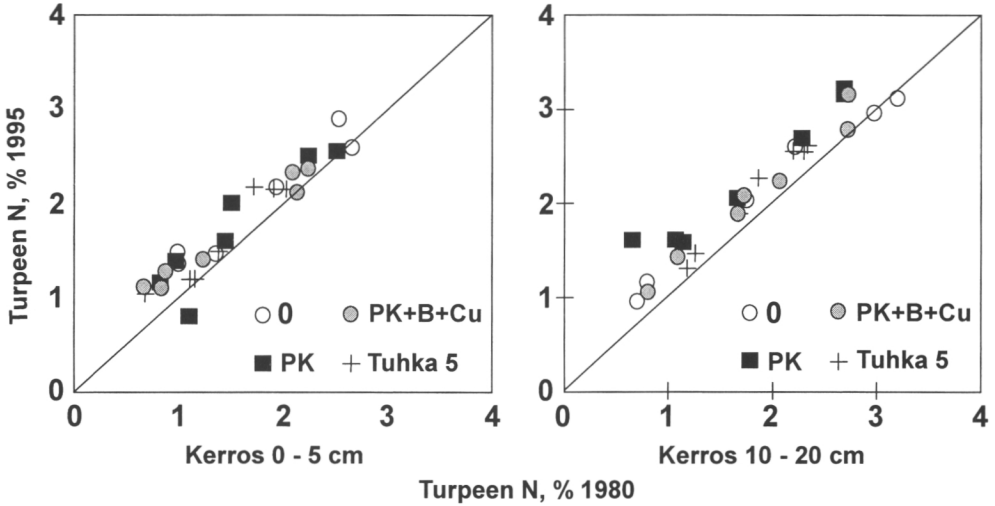
2. Ravinnetalouden erityispiirteet turvemaidella

Ravinnetalouden suhteen ojitetut suometsät ovat jatkuvassa muutostilassa ja poikkeavat täysin kangasmaiden metsistä. Orgaanisesti sitoutuneet typpi ja fosfori konsentroituvat (kuva 1, Kaunisto & Paavilainen 1988), mutta mm. vapaasti maassa liikkuvat kalium ja boori vähenevät puunkorjuussa ja huuhtoutumalla (Kaunisto & Paavilainen 1988). Myös sinkkiä turvemaidella on niukasti.

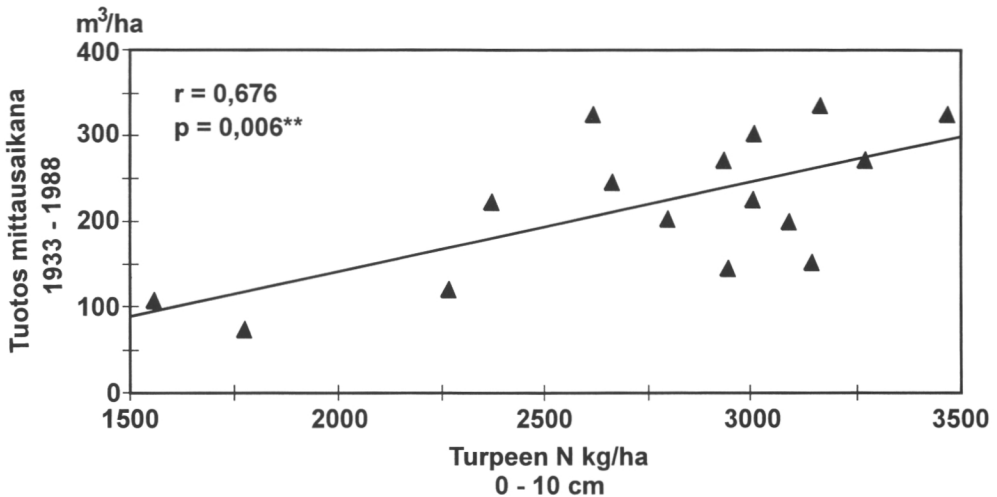
Lannoitteina lisättävistä kasvinravinteista puut käyttävät eniten typpeä, toiseksi eniten kaliumia kolmanneksi eniten fosforia. Suhde on karkeasti 100:33:11. Räteturpeessa näiden ravinteiden suhde (N:P:K) on n. 100:3–4:1–3 (Kaunisto & Paavilainen 1988, Kaunisto 1996). Verrattuna typpeen puuston fosforin tarve on siis suunnilleen kolminkertainen turpeen sisältämän fosforin määrään verrattuna. Kun mikrobitoiminta vapauttaa typpeä ja fosforia turpeesta suunnilleen samalla nopeudella, on luonnollista, että turvemaidella yleensä on puutetta fosforista typpeen verrattuna. Kalium ei ole sitoutuneena orgaaniseen aineeseen, joten sen saatavuus ei riipu mikrobitoiminnasta eikä sitä voida verrata typpeen samoilla perusteilla kuin fosforia. Suurella osalla soita, erityisesti alunperin märillä nevarämeillä ja nevoilla, kaliumia kuitenkin on vähän verrattuna puustoon sitoutuviin määriin. Kaliumin määrä turpeessa ei näytä olevan sidoksissa turpeen typpeen samoinkuin fosforin määrä (Vahtera 1956, Westman 1981, Kaunisto 1996). Myös booria turpeessa on niukasti. Monissa tapauksissa ojituksella aikaansaatu kasvu tyrehtyy esim. parhailla rämeillä kaliumin ja boorin niukkuuteen ja lisäksi myös epätasapainoisen typpi-fosfori -suhteen vuoksi. Suotyypin perusteella arvioituna potentiaalisia ongelma-alueita on ojitettu n. 1,4 milj. ha. Systemaattista näytealoihin perustuvaa selvitystä tästä ei kuitenkaan ole tehty.

Puuston kasvu näyttää riippuvan lähes suoraviivaisesti turpeen kokonaistyyppipitoisuudesta kivennäisravinteilla lannoitetuissa nuorissa puustoissa (Kaunisto 1982, 1987), mutta myös lannoittamattomissa varttuneissa puustoissa (kuva 2). Jos turpeen tyyppipitoisuus on riittävän korkea, puut saavat turpeesta typpeä hajotustoiminnan tuloksena tai mahdollisesti myös suoraan orgaanisina tyyppiyhdisteinä. Jos se puolestaan

on liian matala, typpi sitoutuu mikrobistoon. Tämän vuoksi lannoitus lisää kasvua eniten runsastyyppisillä soilla. Toinen olennainen tekijä on lämpösumma (Keltikangas ym. 1986). Sitä turpeen typpipitoisuuden alarajaa, jossa lannoitus kivennäisravinteilla lisää puiden kasvua taloudellisesti kannattavasti erilaisissa lämpösummaoloissa ei ole riittävästi selvitetty. Näyttää kuitenkin siltä, että ojituksen ansiosta turpeen typpipitoisuus lisääntyy ajan funktiona ja että siten puuston kasvuolosuhteet typen osalta jonkin verran paranevat myös alunperin niukkatyyppisillä soilla (kuva 1).



Kuva 1. Turpeen kokonaistyyppipitoisuuden muutos turpeen pintakerroksessa 15 vuoden aikana Enso Oy:n omistamalla Iiomantsin Särkän koelueella. PK = raakafosfaattia 310 kg/ha + kalisuolaa 156 kg/ha, B = lannoiteboraattia 7,5 kg/ha, Cu = kuparioksidia 8 kg/ha, Tu 5 = 5 000 kg/ha huonolaatuista puuntuhkaa (P0,56 %, K 1,82 %).



Kuva 2. Puuston kokonaistuotoksen vuosina 1933 – 1988 riippuvuus turpeen typen kokonaismäärästä 10 cm:n pintakerroksessa Metlan pitkäaikaisilla kasvukoelooilla metsähallinnon Karstulan Mustapuron koelueella.

3. Puuntuhkan käyttömahdollisuudet

3.1 Lannoitusvaikutus

Vanhoissa tuhkakokeissa käytettiin yleensä pienten lämpölaitosten hyvin palanutta kuivaa tuhkaa. Kohtalaisen pienillä tuhkan määrällä, 5 000 kg/ha, on esim. niukkatyypisellä isovarpuisella rämeellä Vilppulan Jaakoinnuolla saatu aikaan huomattava korkea puuston kasvu 6 – 7 m³/ha/v (Mikkeli & Takamaa 1995, Kaunisto 1996). Lisäys lannoittamattomaan oli tässä tapauksessa keskimäärin n. 3,0 m³/ha/v yli 50 vuoden aikana. Muhoksella on v. 1947 annetulla 16 000 kg:n tuhkamäärällä hehtaaria kohden saatu seuraavien 47 vuoden aikana jopa 10 m³:n keskikasvu hehtaarilla aikaisemmin puuttomalla, runsastyypisellä suolla (Moilanen ym. 1996). Toisaalta 8 000 kg/ha saaneella koelalla kasvu on ollut keskimäärin selvästi alempi, 7,6 m³/ha/v.

Kaupallisilla lannoitteilla lannoitettaessa vesiliukoisen kaliumin vaikutus kestää 15 – 20 vuotta (Kaunisto 1989, 1992). Sen sijaan fosforin vaikutus näyttää alustavien tulosten mukaan voivan kestää jopa 25 – 30 vuotta (Silfverberg & Hartman 1997). Tuhkalannoitus on lisännyt puuston kasvua yleensä kauemmin kuin kemialliset lannoitteet. Em. Jaakoinnuon tapauksessa vaikutus on kestänyt jo yli 50 vuotta. Toisaalta on myös esimerkkejä kasvun taantumisesta jo 20 – 30 vuoden kuluttua tuhkalannoituksesta (Silfverberg & Issakainen 1996).

Tuhkalannoituksen vaikutuksen kesto riippuu monista eri tekijöistä. Tärkeimmät ovat tuhkassa tuleva kivennäisravinteiden määrä (Silfverberg ja Huikari 1985) ja niiden käyttökelpoisuus (tuhkan palamisaste), turpeen typpipitoisuus ja lämpösomma. Yleensä tuhkalannoituksessa on kivennäisravinteita annettu moninkertainen määrä kemiallisten lannoitteiden suosituksiin verrattuna, mikä osaltaan selittää sen vaikutuksen pitkän keston. Erityisen tärkeä näyttäisi olevan tuhkassa tulleen kaliumin määrä, joka hyvässä tuhkassa 5000 kg/ha:n annostuksella voi olla jopa 250 – 300 kg/ha. Tästä huolimatta vanhoissa tuhkalannoituskokeissa on yleensä voitu havaita kaliumin loppuvan ennen muita ravinteita ja vaikutusajan riippuvan annetusta tuhkan määrästä. Tämä näkyy sekä puuston kasvun alenemisena että puiden neulasten alentuneina kaliumpitoisuuksina (Moilanen ym. 1996). Normaalisissa lannoituksessa kaliumia annetaan vain n. 80 kg/ha.

3.2 Tuhkan määrä ja laatu

Parhaimmillaan puhdas puuntuhka sisältää kivennäisravinteita samassa suhteessa kuin puut niitä kasvua-lustasta ottavat. Tällöin se edustaa tasapainoista kivennäisravinteiden suhdetta. Vaikka puun käsittely- ja polttomenetelmät ovat yhtenäistyneet, vaihtelee tuhkan laatu edelleenkin varsin paljon (Silfverberg 1996 a ja b). Yleisenä piirteenä näyttää lisäksi olevan, että metsäteollisuuden tuhkassa ravinnepitoisuudet ovat alempia kuin haketuhkassa tai koivuhalon tuhkassa, jolla monien vanhojen tuhkakokeiden hyvät tulokset on saatu (Silfverberg 1996 a).

Laatua alentaa mm. puuraaka-aineen säilytys vesivarastossa, sen runsas kastelu, tuhkan sammuttaminen veteen ja tuhkan pitkäaikainen säilytys ulko-olosuhteissa. Kaikissa tapauksissa vesiliukoista kaliumia ja booria huuhtoutuu, jonka seurauksena näiden ravinteiden matalat pitoisuudet voivat pahimmillaan tehdä tuhkan jopa käyttökeltomaksi monipuolisena metsän lannoitteena. Myös esim. turpeen ja puun sekapolto alentaa tuhkan kalium- ja booripitoisuuksia. Tuhkan laatua alentaa myös puutteellinen palaminen, jolloin vajavaisesti palanutta ainesta on runsaasti ja tuhkan ravinnepitoisuus painoyksikköä kohden matala. Tällöin myös ravinteiden vapautuminen tuhkasta on hitaampaa. Laadun selvittämiseksi puuntuhkasta on yleensä syytä tehdä ravinneanalyysi ennen käyttöä. Tyypeä tuhkassa ei ole.

Lannoitussuosituksen mukaan fosforia tulisi turvemaidella antaa 40 – 45 kg ja kaliumia n. 80 kg/ha (Paavilainen 1979). Myös tuhkan mukana suometsään pitäisi tulla kyseisiä ravinteita vähintään nämä määrät. Tällöin tuskin kuitenkaan saavutetaan kaupallisia lannoitteita olennaisesti pidempää vaikutusaikaa, vaikka kalium tuhkassa ei olekaan aivan yhtä helposti huuhtoutuvassa muodossa kuin kalisuolassa. Em. fosforin määrien saavuttamiseksi tarvittaisiin keskimääräisten tuhkan ravinnepitoisuuksien perusteella laskettuna

hehtaaria kohden vähintään 5000 kg kuivaa tuhkaa. Metsäteollisuudessa syntyy vuodessa puuperäistä tuhkaa n. 100 000 tonnia. Teollisuudessa syntyvällä tuhalla voitaisiin vuosittain lannoittaa suometsiä näin ollen vajaat 20 000 hehtaaria. Varovaisenkin arvion mukaan lannoitustarpeessa olevia suometsiä on vähintään kaksinkertainen määrä ja lannoituksen vaikutuksesta todennäköisesti kasvuaan lisääviä moninkertainen määrä. Ongelmana on kuitenkin monesti liian pitkät kuljetusmatkat tuhkan tuotantopisteestä sopivalle kohdealueelle.

3.3. Lannoituskohteet

Kasvupaikalta poistuu hakkuissa verrattain paljon kivennäisravinteita turpeen sisältämiin ravinmääriin verrattuna (Kaunisto 1996). Vanhalla ojitusalueella, josta puustoa on korjattu jo vuosikymmenien ajan, saattaa turpeen pintakerroksissa olla kaliumia vain puolet ojittamattoman vastaavan suotyypin kaliumin määrästä. Tämä ero vastaa suunnilleen runkopuun korjuussa poistuneen kaliumin määrää (Kaunisto & Paavilainen 1988). Ongelma koskee erityisesti kaliumia, mutta myös sinkkiä ja booria. Hakkuissa poistuva ravinteiden määrä riippuu olennaisesti biomassan korjuun intensiteetistä. Latvuksen alemman puoliskon (oksineen ja neulasineen) sisällyttäminen ensiharvennuksessa kuivamassan kertymään lisäsi eräässä tutkimuksessa kaliumin poistumaa 114 – 115 % kuivamassan saannon lisääntyessä vain n. 30 % (Kaunisto 1996).

Tuhkalannoituksella palautetaan kasvupaikalle takaisin ravinnekiertoon kivennäisravinteita, joita monilla turvemailla muutoin on niukasti ja joita puun korjuu jo sellaisenaan kuluttaa. Puuston kasvun edellytyksenä on, että turpeesta mineralisoituu riittävästi typpeä puiden käyttöön. Parhaita tuhkalannoituskohteita ovatkin runsastyypiset, saraiset ja sitä paremmat suot. Tuhka vaikuttaa kuitenkin myös turpeen tyyppilouteen vähentämällä turpeen happamuutta ja luomalla tällä tavoin paremmat mahdollisuudet bakteerien hajotustoiminnalle ja typen vapautumiselle myös puuston käyttöön. Tuhkalannoituksen ulkopuolelle tulisi joka tapauksessa jättää ainakin karuimmat rahkamättäiset suot ja rahkasuot. Myös ravinnehäiriöistä kärsivillä, runsastyypisillä metsitetyillä turvepelloilla (Ferm et al.1992) samoin kuin typen ja muiden ravinteiden epätasapainon vaivaamilla suopohjilla (Aro & Kaunisto1997) puuntuhkalla on saatu hyviä tuloksia.

3.4. Ympäristövaikutukset

Tuhkan mukana metsäekosysteemin alkuainekiertoon palautuu myös raskasmetalleja, joista ihmisen kannalta haitallisimpana pidetään kadmiumia, koska sitä voi kertyä riistaeläimiin, sieniin ja marjoihin. Puuntuhkan kadmiumpitoisuudet vaihtelevat muutamasta mg/kg aina yli 30 mg/kg:aan. Keskimääräisenä arvona Suomen olosuhteissa pidetään 10 mg/kg kuivaa tuhkaa. Jos tämän perusteella lasketaan puuntuhkassa metsäluontoon tulevan kadmiumin määriä, voidaan todeta, että kivennäismailla tämä edustaa vai murto-osaa metsämaassa olevasta kadmiumista. Turvemailla tuhka lisää turpeen kadmiumpitoisuutta varsin huomattavasti, joskaan ei vielä lähellekään sitä kriittistä rajaa, jossa edellytetään maan puhdistamista.

Puuntuhkalannoitus ei kuitenkaan ole lisännyt kadmiumpitoisuuksia esim. hillan eikä myöskään mustikan marjoissa ainakaan lyhyellä aikavälillä (Silfverberg & Issakainen 1991). Missä määrin tuhkan korkea pH vähentää kadmiumin liukoisuutta ja siirtymistä kasvillisuuteen ei ole tiedossa. Metsäteollisuuden, Metsätehon ja Metsäntutkimuslaitoksen vuonna 1997 aloittama tuhkaprojekti tulee antamaan tähän, samoin kuin tuhkasta tapahtuvaan alkuaineiden huuhtoutumiseenkin lisävalaistusta lähitulevaisuudessa.

Mikäli voidaan yksiselitteisesti osoittaa, että puuntuhkasta ei aiheudu kohtuuttomia ympäristöhaittoja alkuainerikastumien tai -päästöjen muodossa, voidaan tämä muutoin arvoton, ja ongelmallinenkin kaatopaikkoja rasittava jäte saattaa arvokkaaseen hyötykäyttöön suometsien terveyslannoitteena. Tuhkan käyttö laajassa mitassa edellyttäneekin sen esikäsitteilyä pölyämisen estämiseksi.

Taulukko 1. Puuntuhkassa tulevan kadmiumin vaikutus maan kadmiumpitoisuuteen.

	Paino, kg/ha	Kadmiumia, mg/kg	Tuhkassa tulevan kadmiumin aiheuttama lisäys, mg/kg maata
Tuhka	5 000	n. 10	
Kivennäismaa, 20 cm:n kerros. Tiheys 1,5 g/ml	$3,0 \times 10^6$	n. 1,0	0,05/ $3,0 \times 10^6$ = 0,017 = 1,7%
Turvemaa, 20 cm:n kerros. Tiheys 0,125 – 1,75 g/ml	$0,25 - 3,50 \times 10^6$	n. 1,0 0,4 – 1,2	0,05/ $0,25 - 0,35 \times 10^6$ = 0,2 – 0,14 50 – 12 %
Maan puhdistamisen toimenpideraja		10	

Kirjallisuutta:

- Aro, L., Kaunisto, S. & Saarinen, M. 1997. Suopohjien metsitys. Hankeraportti 1986 – 1995. Summary: Afforestation of peat cutaway areas. Project report in 1986 – 1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 634. 51 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.
- Kaunisto, S. 1982. Development of pine plantations on drained bogs as affected by some peat properties, fertilization, soil preparation and liming. Seloste: Männen istutustaimien kehityksen riippuvuus eräistä turpeen ominaisuuksista sekä lannoituksesta, muokkauksesta ja kalkituksesta ojitetuilla avosoilla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 109. 56 s.
- 1987. Effect of refertilization on the development and foliar nutrient contents of young Scots pine stands on drained mires of different nitrogen status. Seloste: Jatkolannoituksen vaikutus mäntytaimikoiden kehitykseen ja neulasten ravinnepitoisuuksiin typpitaloudeltaan erilaisilla ojitetuilla soilla. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 140. 58 s.
- 1989. Jatkolannoituksen vaikutus puuston kasvuun vanhalla ojitusalueella. Summary: Effect of refertilization on tree growth in an old drainage area. *Folia Forestalia* 724. 15 s.
- 1992. Effect of potassium fertilization on the growth and nutrition of Scots pine. Tiivistelmä: Kalilannoituksen vaikutus männyn kasvuun ja ravinnetilään. *Suo* 43(2): 45–62.
- 1996. Massahakemetelmä ja ravinnepoistuma rämeen ensiharvennusemetsikössä. Julkaisussa: Laiho, O. & Luoto, T. (toim). *Metsäntutkimuspäivä Porissa 1995*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 593: 15–23.
- & Paavilainen, E. 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands. Seloste: Turpeen ravinnevarat vanhoilla ojitusalueilla ja puuston kasvu. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 145. 39 s.
- Keltikangas, M., Laine, J., Puttonen, P. & Seppälä, K. 1986. Vuosina 1930 – 78 metsäojitetut suot: ojitusaluiden inventoinnin tuloksia. Abstract: Peatlands drained for forestry during 1930 – 1978: Results from field surveys of drained areas. *Acta Forestalia Fennica* 193: 1–94.
- Mikkilä, H. & Takamaa, H. (toim.). *Jaakkoinsuon koeojitusalue*. Retkeilyopas. 1995. Metsäntutkimuslaitos. ISBN 951-40-1486-3. 49 s.
- Moilanen, M., Hokkanen, T.J. & Silfverberg, K. 1996. Ash fertilization converts mire to a productive forest: Leppiniemi experiment (Muhos, Finland) 1932 – 1995. Manuscript.

- Paavilainen, E. 1979. Metsänlannoitusopas. Kirjayhtymä. Helsinki. 112 s.
- Silfverberg, K. 1996a. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 588. 27 s.
- 1996b. Tuhkalannoitteen laatuvaatimukset. Julkaisussa: *Finer, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 599: 9–13.
- & Hartman, M. 1997. Effects of different phosphorus fertilizers on the nutrient status and growth of Scots pine stands on drained peatlands. Manuscript
- & Huikari, O. 1985. Summary: Wood-ash fertilization on drained peatlands. *Folia Forestalia* 633.
- & Issakainen 1991. Tuhkalannoituksen vaikutus metsämarjoihin. Effects of ash fertilization on forest berries. *Folia Forestalia* 769, 21 s.
- & Issakainen, J. 1996. Skogstillväxt på en askgödsblad, nordfinsk kalmyr – 40 årigt perspektiv på asktillförsel i praktisk skala (short report -artikkeli). Summary: Forest growth on an ash-fertilized oligotrophic fen in northern Finland. *Suo* 47(4): 137–139.
- Vahtera, E. 1955. Metsänkasvatusta varten ojitettujen soiden ravinnepitoisuuksista. Referat: Über die Nährstoffgehalt der für Walderziehung entwässerten Moore. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 45(4). 108 s.
- Westman, C. J. 1981. Fertility of surface peat in relation to the site type and potential stand growth. Seloste: Pintaturpeen viljavuustunnukset suhteessa kasvupaikkatyypin ja puuston kasvupotentiaaliin. *Acta Forestalia Fennica* 172. 77 s.

Ravinteiden huuhtoutuminen tuhkalannoitetusta turpeesta

Klaus Silfverberg & Anna-Liisa Mertaniemi

Tiivistelmä

Kasvihuonekokeessa tutkittiin lannoitettujen ja kasteltujen turveprofiilien läpi valuneiden vesien ja itse turpeen ravinnesisältöä. Käsittelyinä olivat Suometsien PK 500 kg/ha, koivuhalon tuhkaa 5000 ja 25 000 kg/ha sekä lannoittamaton kontrolli. Lannoituksen jälkeisiä kastelukertoja oli kolme.

Perkolaatiovedet sisälsivät lannoituskäsittelyillä merkittävästi enemmän ravinteita kuin kontrolli. Kokonaishuuhtoutumat olivat 0,01 – 20,1 % turveprofiilin ravinnesisällöstä ollen selvästi suurimmat kaliumin kohdalla. Ravinteiden huuhtoutumisalttius oli $K > Mg > Ca > Mn > P$. Lannoituskäsittelyt lisäsivät myös huomattavasti nitraatin huuhtoutumaa. Ravinteita huuhtoutui suhteellisesti eniten Suometsien PK:sta ja absoluuttisesti eniten suurimmasta tuhkamäärästä.

Turveanalyysien mukaan useimpien ravinteiden pitoisuudet olivat nousseet vain pintaturpeessa (0 – 5 cm). Ai-nostaan kaliumin pitoisuudet olivat kohonneet merkittävästi koko (0 – 20 cm) turveprofiilissa.

Suurten ravinnemäärien käyttöä tuhkalannoituksessa tulisi välttää huuhtoumatappioiden minimoimiseksi. Tulokset vahvistavat käsitystä että PK-lannoitteiden muuttaminen apatiittipohjaisiksi sekä puuntuhan rakeistaminen ovat olleet oikeansuuntaisia toimenpiteitä huuhtoutumishaittojen vähentämiseksi.

1. Johdanto

Ravinteiden huuhtoutumista turpeesta ja lannoitteista metsäojitusalueilla on tutkittu jo pitkään (Karsisto 1970, Ahti 1983, Haveraaen 1986, Finer 1991). Fosforin huuhtoutuma on yleensä ollut vain murto-osa kaliumin huuhtoutumasta (Kaunisto & Paavilainen 1988, Nieminen & Ahti 1993). Vaikka fosforin huuhtoutuminen on kvantitatiivisesti vähäistä, seurauksena on kuitenkin usein vesistöjen rehevöityminen. Kaliumin huuhtoutumisen merkittävin haitta on puustolle aiheutuva ravinnetappio.

Viime aikoina mielenkiinto turvemaiden tuhkalannoitusta kohtaan on ollut kasvussa (Ekologiska ... 1996, Finer ym. 1996). Tässä yhteydessä kaliumin riittävyyteen ja fosforin huuhtoutumiseen liittyvät tutkimukset ovat tulleet ajankohtaisiksi (Lipponen 1991). Puuntuhan korkea pH saattaa sekä vaikeuttaa (useat hivenravinteet) että edistää (typpi, fosfori) ravinteiden saatavuutta turpeesta (Pätilä 1990, Nieminen & Ahti 1993). Lisäksi ravinteet tuhkassa ovat vaikealiukoisemmassa muodossa kuin kauppalannoitteissa (esim. Haveraaen 1986). Tuhkalannoitetuilla turvemailla puuston kehitys on aluksi muutaman vuoden ajan hitaampaa kuin kauppalannoitteita saaneilla kohteilla (Silfverberg 1991).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan ravinteiden huuhtoutumista turpeesta analysoimalla lannoitettujen ja kasteltujen turveprofiilien perkolaatiovesiä sekä ravinteiden allokaatiota itse turveprofiilissa.

Kiitämme Arja Tervahautaa, Erkki Ahtia ja Heikki Veijalaista kommentista käsikirjoitukseen. Kiitokset myös Muhoksen tutkimusasetaman laboratorion työntekijöille.

2. Koejärjestelyt

2.1 Käytetyn turpeen ja lannoitteiden ominaisuudet

Syyskuussa 1985 otettiin Muhoksen Leppiniemen tuhkalannoituskoealan 21 b (64°51' N, 26°04' E) välipinnasta turvenäytteitä, 25 x 25 x 25 cm, kasvihuoneessa tehtävää huuhtoutumiskoetta varten. Kasvupaikka oli alunperin mesotrofinen kalvakkaneva, joka oli ojitettu vuonna 1933 ja saanut koivuhalon tuhkaa 8000 kg/ha

huhtikuussa 1947. Lannoitushetkellä rakkavaltainen pintaturve oli heikosti maatonut ja sen pH oli 4,5 (Silfverberg & Hotanen 1989).

Tähän tutkimukseen otettujen turveprofiilien ravinnemäärät ovat vuoden 1947 tuhkalannoituksen vuoksi edelleen melko korkeat (Silfverberg & Hotanen 1989, taulukko 1).

Käytetty tuhka oli Muhoksen tutkimusaseman kuivaa ja seulottua koivuhalon tuhkaa. Kemira Oy:n rakeistettu Suometsien PK-lannos oli vuodelta 1985. Lannoituksessa annetut ravinnemäärät (kg/ha) ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Luontaiset ja lisätyt ravinnemäärät (kg/ha)

Ravinne	Turve * 0 – 20 cm	Puun tuhka		Suo- PK
		5000 kg	25 000 kg	500 kg
N	8165	21	105	10
P	420	119	595	44
K	91	453	2265	83
Ca	1385	1110	5550	118
Mg	148	215	1075	1,5
Mn	89	72	360	-
Fe	4241	48	240	0,5
Zn	18,2	14	70	-
Cu	1,8	1	5	-

* Silfverberg & Hotanen (1989)

2.2 Laboratoriotyöt ja aineiston käsittely

Arvottuja lannoituskäsittelyjä oli neljä (1) kontrolli, (2) PK = Suometsien PK-lannos 500, (3) T5 = puun tuhkaa 5000 ja (4) T25 = 25 000 kg/ha. Toistoja oli kolme. Käsittelyt (2) ja (3) olivat 1980-luvun puolivälissä käytännön määräsuosituksia. Käytetyt muovipöntöt olivat läpimitaltaan 20 cm, joten yhden turveprofiilin volyymi oli 314 cm² (pinta-ala) x 20 cm (syvyys) = 6,28 litraa.

Lannoitus astioihin tehtiin 30.9.1985. Tasaisen levityksen varmistamiseksi lannoitteet levitettiin astiaan turpeen pinnalle neljänneksittäin. Turpeen pinnalla ollutta kasvipeitettä ei poistettu. Kokeen aikana kasvihuoneen lämpötila oli 15 – 20 °C.

Kastelu ionivaihdetulla vedellä ja perkolaatioveden keräys tehtiin neljästi: 24.9., 30.9., 7.10 ja 14.10.1985. Kastelun oli tarkoitus matkia luontaista sadetta. Ensimmäinen kastelukerta oli ns. kalibrointikastelu. Kukin kastelu tehtiin kolmena 20 mm:n jaksona, yhteensä 60 mm, jonka jälkeen perkolaatiovetä otettiin talteen kastelua seuranneen 24 tunnin ajan. Siten jokainen käsittely sai 240 mm vettä.

Ravinneanalyytit perkolaatiovesistä tehtiin jokaisen kastelun jälkeen. Turpeesta analysoitiin 0 – 5, 5 – 10 ja 10 – 20 cm:n kerrokset kahdesti, sekä ennen kasteluja ja lannoitusta että kokeen lopussa. Koetta edeltävä turveanalyysi tehtiin ylimääräisestä turpeesta. Happamuus (pH (H₂O) 1:2,5), NO₃-N sekä totaaliravinteet P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn ja Cu analysoitiin sekä vedestä että turpeesta, nitraattipitoisuus ainoastaan vedestä. Turpeesta totaaliravinteet analysoitiin atomiabsorptiospektrofotometrillä, lukuunottamatta fosforia, joka mitattiin spektrofotometrisesti (Halonen & Tulkki 1981). Vesistä metallit analysoitiin atomiabsorptiospektrofotometrisesti (SFS 3025) sekä nitraattipitoisuus spektrofotometrisesti. Totaalifosfori analysoitiin standardimenetelmin spektrofotometrisesti.

Turveprofiilien kokonaisravinnemäärien laskemiseen käytettiin Silfverbergin ja Hotasen (1989) ilmoittamia turpeen in situ tiheyksiä. Ravinnelisäyksen osuus oli suurin kaliumin kohdalla käsittelyssä T25, missä annetun K:n osuus oli 97,0 % turveprofiilin koko kaliummäärästä (taulukko 2).

Taulukko 2. Turveprofiilien ravinnesisältö (mg / 6,28 litraa) kokeen alussa

Ravinne	Kontrolli		PK		T5		T25	
	luont	lisätty	luont	lisätty	luont	lisätty	luont	lisätty
P	1763	-	1568	137	2186	372	1337	1860
K	267	-	241	261	318	1422	219	7112
Ca	4563	-	5707	371	4943	3483	6254	17419
Mg	443	-	474	5	486	673	452	3368
Mn	176	-	285	-	521	225	322	1123

Perkolaatiovesien ravinnepitoisuuksien ohella tarkasteltiin myös huuhtoutuneita ravinnemääriä (mg) suhteessa (%) turveprofiilin kokonaisravinnesisältöön. Turveprofiilin alin kerros, 20 – 25 cm, on jätetty pois jatkolaskelmista. Tämän kerroksen ravinnepitoisuudet olivat turveprofiilin alhaisimmat sekä ennen että myös jälkeen kokeen. Ravinteiden pidättyminen on siten ollut ilmeisen vähäistä. Niukkaravinteisen kerroksen ravinteet tuskin ovat lisänneet perkolaaatiovesien ravinnemäärääkään.

Tilastolliset analyysit tehtiin yksi- ja kaksisuuntaisella varianssianalyysillä (BMDP). Selittävinä tekijöinä olivat lannoituskäsittelyt ja kastelukerrat. Selitettäviä muuttujia olivat perkolaaatiovesien ravinnepitoisuudet (mg/l) ja ravinteiden kokonaishuuhtoutuma (mg). Turveprofiilien ravinnepitoisuuksia (mg/g) eri syvyyksillä ennen koetta ja sen jälkeen testattiin t-testillä.

3. Tulokset

31. Nitraatti, fosfori ja kalium

Perkolaaatiovesien nitraattipitoisuudet T5:lla olivat noin 2 mg/l eivätkä poikenneet merkitsevästi kontrollista (kuva 1). PK-lannoituskäsittelyssä nitraattipitoisuudet, 6 – 7 mg/l, olivat sitävastoin kontrollia merkitsevästi korkeammat. Korkein perkolaaatioveden nitraattipitoisuus, 17 – 18 mg/l, tavattiin käsittelyllä T25. Nitraattipitoisuudet eri kastelukerroilla eivät poikenneet merkitsevästi ($F=0.09$, $p=0.912$). Kokonaishuuhtoutuma (mg) oli suurin käsittelyllä T25 (taulukko 3).

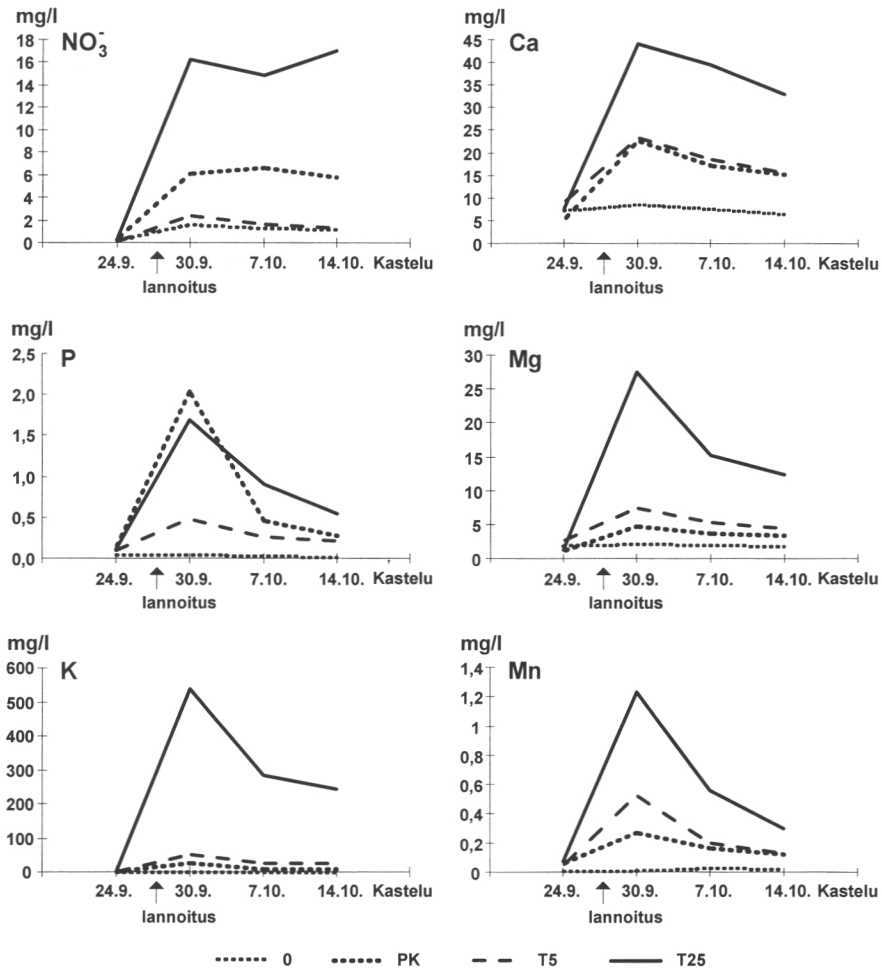
Taulukko 3. Perkolaaatiovesien mukana poistuneet ravinnemäärät (mg ja % turveprofiilin kokonaisravinnemäärästä) kalibrintikastelu mukaanlukien. Alleviivatut luvut poikkeavat merkitsevästi ($p < 0,05$) kontrollista.

Ravinne	Kontrolli		PK		T5		T25	
	mg	%	mg	%	mg	%	mg	%
NO₃-N	5,98	n.d.	28,68	n.d.	8,21	n.d.	<u>69,27</u>	n.d.
P	0,16	0,01	<u>3,85</u>	0,22	1,45	0,05	<u>4,44</u>	0,14
K	1,90	0,70	<u>61,70</u>	12,2	<u>158,50</u>	9,10	<u>1477,00</u>	20,10
Ca	38,30	0,80	<u>85,40</u>	1,40	91,00	1,10	<u>166,10</u>	0,70
Mg	9,80	2,20	<u>18,00</u>	3,80	<u>26,90</u>	2,30	<u>75,20</u>	2,00
Mn *	~ 0,05	0,03	<u>0,80</u>	0,27	1,28	0,17	2,75	0,19

* ei tilastollista testausta määrittämissä rajan alittavien havaintojen vuoksi

Perkolaaatioveden fosforipitoisuudet kontrollilla olivat muita käsittelyjä merkitsevästi alemmat (0,05 mg/l; kuva 1). Korkeimmat pitoisuudet todettiin käsittelyllä T25 ja PK, varsinkin ensimmäisen (lannoituksen jälkeisen) kastelun jälkeen. PK-käsittelyllä pitoisuus oli 2 mg/l, hieman enemmän kuin T25:lla, silloisen Suo-PK:n sisältäessä noin 20 % vesiliukoista fosforia (Ahti & Paarlahti 1988). Käsittelyllä T5 fosforin pitoisuus

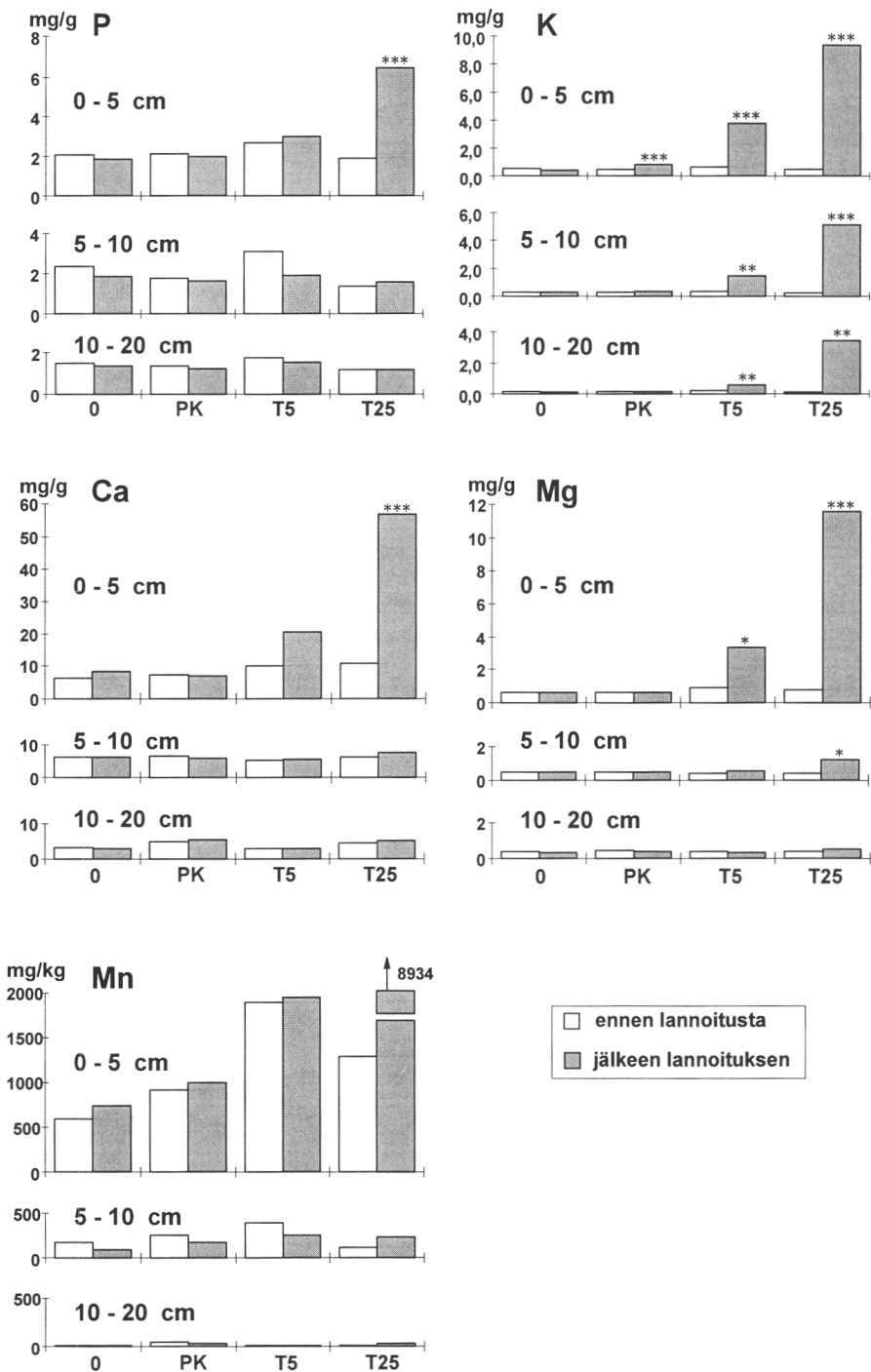
det olivat alle 0,5 mg/l. Kastelukertojen välinen ero oli tilastollisesti merkitsevä huuhtoutumisen ollessa suurin alussa (kuva 1).



Kuva 1. Perkolaatiovesien pitoisuudet (mg/l) kastelukertojen jälkeen. Ensimmäisen lannoituksen jälkeisen-kastelun jälkeen T5 ei poikennut merkitsevästi kontrollista nitraatin, fosforin eikä kaliumin kohdalla.

Fosforia huuhtoutui suhteellisesti eniten Suo-PK:sta, 3,85 mg, eli 0,22 % turveprofiilin fosforisisällöstä. T25:n huuhtoutuma oli 4,44 mg eli 0,14 % (taulukko 3), vaikka fosforin lisäys PK:hon verrattuna oli 13-kertainen ja sen kokonaismääräkin turveprofiilissa kaksinkertainen. Vaikka kaikki kokonaishuuhtoutumat olivat < 1 % lannoitetut käsittelyt erosivat merkitsevästi kontrollista (taulukko 3).

Turpeessa fosforipitoisuuksien muutokset olivat vähäiset. Ainoastaan käsittelyllä T25 kerroksen 0–5 cm pitoisuudet olivat merkitsevästi kohonneet. Syvemmissä kerroksissa fosforia oli hieman vähemmän kasteluiden jälkeen (kuva 2).



Kuva 2. Totaaliravinteiden pitoisuudet turveprofiilissa kokeen alussa ja lopussa. Tähdet ilmaisevat ajan-kohtien (ennen, jälkeen) välisen eron.

Kalium oli odotetusti helppoliukoisin tutkituista ravinteista. Käsittelyllä T25 perkolaatioveden K-pitoisuudet olivat 1. kastelukerran jälkeen yli 500 mg/l, 2. ja 3. kerralla selvästi vähemmän. T5:n ja PK:n kaliumpitoisuudet olivat kauttaaltaan ≤ 50 mg/l, kontrollin alle 1 mg/l (kuva 1). Lannoituskäsittelyjen ja kastelukertojen erot sekä näiden välinen yhdysvaikutus olivat erittäin merkitseviä.

Koko tutkimuksen voimakkain huuhtoutuma todettiin käsittelyllä T25. Perkolaatiovesien mukana poistui 1477 mg eli 20,1 % koko turveprofiilin kaliummäärästä. Valtaosa huuhtoutuneesta kaliumista oli siten tässä kokeessa lisättyä (taulukko 2). Myös käsittelyissä PK ja T5 kokonaishuuhtoutumat olivat suhteellisesti korkeat; 9,1 ja 12,2 % koko turveprofiilin kaliummäärästä. Kontrollin kokonaishuuhtoutuma oli vain 1,9 mg eli 0,7 % (taulukko 3). Laskettaessa huuhtoumat pelkästä ravinnelisäyksestä (ks taulukko 2) huuhtoumaprosentit muodostuvat selvästi suuremmiksi.

Turvenäytteistä saatu tulos ilmensi samaa kuin perkolaatiovedet. Käsittelyillä T5 ja T25 kaliumpitoisuudet koko 0 – 20 cm:n profiilissa olivat merkitsevästi korkeammat kuin ennen koetta. PK:n kohdalla ero oli merkitsevä vain 0 – 5 cm:n kerroksessa. Käsittelyissä T5 ja etenkin PK turpeen kaliumpitoisuudet olivatkin suhteellisen alhaiset 5 – 20 cm:n kerroksessa (kuva 2).

32. Kalsium, magnesium ja mangaani

Lannoittamattoman turveprofiilin perkolaatioveden kalsiumpitoisuus oli 7 – 8 mg/l. Käsittelyllä T25 pitoisuudet olivat 1. kastelukerran jälkeen lähes 30 mg/l ja huuhtoutuminen jatkui voimakkaana 2. ja 3. kastelukerran jälkeenkin. Käsittelyissä T5 ja PK pitoisuudet olivat suurimmillaan runsaat 20 mg/l (kuva 1). Lannoituskäsittelyjen ja kontrollin välinen ero oli merkitsevä, kuten myös kastelukertojen väliset erot. Kokonaishuuhtoutumat olivat 0,7 – 1,4 % (taulukko 3). Pintaturpeen (0 – 5 cm) Ca-pitoisuudet olivat nousseet merkitsevästi ainoastaan tuhkakäsittelyillä T5 ja T25 (kuva 2).

Magnesiumin pitoisuudet perkolaatiovedessä ennen lannoitusta sekä kontrollissa olivat noin 2 mg/l. Myös magnesiumin kohdalla perkolaatiovesien pitoisuus oli selvästi korkein (28 mg/l) käsittelyllä T25 ja 1. kastelukerralla. T5:n pitoisuudet (6 mg/l), olivat hiukan korkeammat kuin PK:lla (kuva 1). Lannoituskäsittelyjen ja kastelukertojen erot sekä näiden yhdysvaikutus olivat tilastollisesti merkitseviä (taulukko 3, kuva 1). Kokonaishuuhtoutuma oli 2,0 – 3,8 % (taulukko 3). Turvekerroksessa 0 – 5 cm Mg-pitoisuudet olivat kummallakin tuhkakäsittelyllä merkitsevästi korkeammat kuin ennen koetta (kuva 2).

Kontrollin Mn-pitoisuudet olivat 0,01 – 0,03 mg/l määritysrajan ylittävien havaintojen osalta. Lannoitetuilla käsittelyillä pitoisuudet olivat 0,2 – 1,2 mg/l. Käsittelyllä T25 oli selvä huippu 1. kastelukerralla (kuva 1). Kokonaishuuhtoutuma oli pienempi kuin 0,3 % (taulukko 3). Turvekerroksen 0 – 5 cm Mn-pitoisuudet olivat selvästi nousseet käsittelyllä T25 (kuva 2).

33. Kupari, sinkki, rauta ja pH

Lannoituskäsittelyt muuttivat vain vähän perkolaatiovesien ja turveprofiilien kuparipitoisuutta. Kuparin ohella myös sinkin vastaavat pitoisuudet olivat usein laitteen määritysrajan (0,01 mg/l) alapuolella. Turveprofiilin syvemmissä kerroksissa kuparin ja myös sinkin muutokset olivat erittäin vähäiset. Raudan pitoisuuksiin lannoituksilla ei ollut selvää vaikutusta.

Tuhkalannoituskäsittelyt vaikuttivat selvimmin perkolaatiovesien ja pintaturpeen happamuuteen. T25 nosti kaikkien perkolaatiovesien pH:n yli seitsemään, T5 ensin 5,9:ään ja 3. kastelukerralla 5,3:een. Turpeen pH-arvot nousivat selvästi 0 – 5 cm:n, mutta hieman myös 5 – 10 cm:n kerroksessa. Suo-PK ei kottanut perkolaatiovesien eikä turpeen pH-lukuja.

4. Tulosten tarkastelu

Lannoittamattomien turveprofiilien perkolaatiovesien ravinnepitoisuudet olivat melko alhaiset, mutta selvästi korkeammat kuin lannoittamattomilla ojitusalueilla (Almberger & Salomonson 1979, Nieminen & Ahti 1993). Lannoituksen jälkeen kaikkien ravinteiden huuhtouma kasvoi voimakkaasti. Fosforin ja mangaanin huuhtoumalla oli selvä huippu ensimmäisen kastelukerran jälkeen, kun taas kalsiumin ja magnesiumin huuhtouma oli jatkuvampaa. Nitraatti, jonka huuhtouma pääasiassa aiheutuu turpeen mineralisaatiosta, huuhtoutui tasaisimmin. Myös kivennäisravinteiden huuhtoumaan vaikuttaa turpeen mineralisaatio. Niiden pitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa kuin mitä on raportoitu lannoitetuilta turvemailta (Ahti & Paarlahti 1988, Nieminen & Ahti 1993).

Kokonaishuuhtoumat vaihtelivat – alkuaineesta ja käsittelystä riippuen – välillä 0,01 ja 20,1 % turveprofiilin koko ravinnesisällöstä. Ravinteiden huuhtoutumisen alttius oli: $K > Mg > Ca > Mn > P$. Tämä pitää yhtä aiempien tutkimusten kanssa (Paavilainen & Kaunisto 1988, Pätilä 1990, Nieminen & Ahti 1993). Verrattuna pelkästään lisättyyn ravinnemäärään huuhtoumaprosentit ovat selvästi korkeampia. Suo-PK:n kohdalla fosforin huuhtouma on tällöin 2,70 eikä 0,22 %. Yhtäpitävästi Haveraenin (1986) tulosten kanssa fosforia (%) huuhtoutui runsaasti enemmän kauppalannoitteista kuin tuhkasta. Senaikainen Suo-PK sisälsi noin 20 % vesiliukoista fosforia (Nieminen & Ahti 1993). Lisäksi PK-käsittely lisäsi esim. mangaanin huuhtoumaa, vaikka sitä ei PK:ssa annettu. Totaalihuhtoumat olisivat todennäköisesti kasvaneet suuremmiksi jos kasteluveden määrää olisi lisätty (Haveraen 1986).

Turveprofiilin luontainen kaliummäärä oli alhainen vuoden 1947 tuhkalannoituksesta huolimatta (Silverberg & Hotanen 1989). Huuhtouma kontrollikäsitteilyllä oli absoluuttisesti vähäinen, mutta prosentuaalisesti merkittävä. Absoluuttinen K-huuhtouma on pitkälti riippuvainen annetusta ravinnemäärästä. Kaliumin huuhtouma oli huomattava myös käsitteilyllä tuhka 5000 kg/ha. Noin 99 % kaliumin huuhtoumasta tuli lisätystä tuhkasta.

Ravinteiden pidätys turpeeseen oli yli 90 %, kaliumia lukuunottamatta. Turveanalyysit osoittivat valtaosan lisäystä ravinteista jääneen 0 – 5 cm:n kerrokseen kuten Haveraenin (1986) tutkimuksessa. Tuhkan ja turpeen pH-lukujen vaikutusta ravinteiden pidätykseen on vaikea arvioida ravinnemäärien kasvaessa rinnan pH:n kanssa.

Fosforin kokonaishuuhtouma oli suurin käsitteilyllä tuhkaa 25 000 kg/ha, 1,4 kg/ha. Se on merkittävä määrä vesistöhaittoja ajatellen (Nieminen & Ahti 1993), mutta suhteessa annostukseen ja turpeen ravinnevaroihin vähämerkityksinen. Puuston ravinnetalouden kannalta olennaisempi on tuhkassa annetun kaliumin nopea ja laajamittainen huuhtoutuminen juuristokerroksesta.

Teoriassa tuhkalannoitus soveltuu hyvin ojitusalueiden K/P-suhteen korjaamiseksi. Turpeessa suhde on 1:5 ja tuhkassa lähes kääntäen 4:1. Puuston tarve on kuitenkin vähäinen tuhkalannoituksessa annettuun ravinnemäärään nähden. Kaliumia oli 453 kg kun tuhkaa annettiin 5000 kg/ha. Kun perkolaatioveden K/P-suhde oli 100 on ilmeistä ettei näin suurten kaliummäärien antaminen tuhkana ole paikallaan. Kaliumia on mieluiten annettava hidasliukoisemmassa muodossa, kuten biotiittina (Kaunisto ym. 1993). PK-lannoitteiden fosfori on jo tällä hetkellä apatiittipohjainen.

Kirjallisuus

- Ahti, E. 1983. Fertilizer-induced leaching of phosphorus and potassium from peatlands drained for forestry. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 111. 20 s.
- & Paarlahti, K. 1988. Ravinteiden huuhtoutuminen talvella lannoitetulta metsäojitusalueelta. *Suo* 39:19–25.
- Almberger, P. & Salomonsson, L.-Å. 1979. Domänverkets gödslingsförsök på torvmarker. Mätningar av fosforutlakning efter gödning med råfosfat. *Sveriges Skogsårdsförbunds Tidskrift* 5–6. 7 s.
- Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring. 1996. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift*. Årgång 135, Nr 13. 125 s.

- Finer, L. 1991. Turvemaiden ravinnetaset. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 383:11–22.
- , Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammassa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599. 65 s.
- Halonen, O. & Tulkki, H. 1981. Ravinneanalyysien työhöjeet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 36. 23 s.
- Haveraaen, O. 1986. Ash fertilizer and commercial fertilizers as nutrient sources for peatland. (Aske og handelsgjødsel som naeringskilde for torvmark). Meddelelser Norsk institutt for skogforskning 39(14):25–263.
- Karsisto, K. 1970. Lannoituksessa annettujen ravinteiden huuhtoutumisesta turvemailta. Suo 21(3–4):60–66.
- Kaunisto, S. & Paavilainen, E. 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 145. 39 s.
- , Moilanen, M. & Issakainen, J. 1993. Apatiitti ja flogopiitti fosfori- ja kaliumlannoitteina suomänniköissä. Summary: Apatite and phlogopite as phosphorus and potassium fertilizers in peatland pine forests. Folia Forestalia 810. 30 s.
- Lipponen, S. 1991. Tuhkalannoituksen vaikutus metsämaan happamuuteen ja ravinteisuuteen. Metsämaatielten syventävien opintojen tutkielma, Joensuun Yliopisto. 72 s. + liitteet.
- Nieminen, M. & Ahti, E. 1993. Talvilannoituksen vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen karulta suolta. Summary: Leaching of nutrients from an ombrotrophic peatland area after fertilizer application on snow. Folia Forestalia 814. 22 s.
- Pätälä, A. 1990. Buffering of peat and peaty soils: Evaluation based on the artificial acidification of peat lysimeters. In: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (eds.). 1990. Acidification in Finland. Finnish Acidification Research Programme HAPRO 1985 – 1990. Springer-Verlag: 305–324.
- SFS 3025
- Silfverberg, K. 1991. Träaska, PK-gödsel och markförbättringsmedel på dränerade tallmyrar. Abstract: Wood ash, PK-fertilizer and two soil ameliorating additives on drained pine mires. Suo 42:33–44.
- & 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.

Pelletoidun tuhkan ja muiden pelletoitujen jäteaineiden vaikutus rauduskoivun taimien alkukehitykseen

Jyrki Hytönen

1. Johdanto

Puutuhkan positiivisista vaikutuksista maan ravinnetalouteen, biologiaan ja puuston kasvuun on jo tiedetty kauan. Tuhkan kierrätyksellä voitaisiin palauttaa metsään puun korjuussa poistuneita ravinteita. Monet kenttäkokeet osoittavat puun tuhkan lisäävän puiden kasvua suometsissä hyvin pitkän aikaa (esim. Silfverberg 1996). Tuhkaa voidaan kangasmetsissä käyttää lähinnä happamoitumisen torjuntaan (Åbyhammar ym. 1994, Mälkönen 1996). Myös esim. metsäteollisuuden bioliete (Veijalainen ym. 1993), jätevedenpuhdistamoilla syntyvät jätelietteet (ks. Moilanen ym. 1987) tai turkistarhauksessa syntyvät lannat voisivat parantaa maaperää ja lisätä taimien kasvua.

Laajamittainen tuhkan palauttaminen takaisin luonnon kiertoon ei ole vielä Suomessa toteutunut. Yhtenä palautusta vaikeuttavana tekijänä ovat olleet irtotuhkaan ja sen levitykseen liittyvät ongelmat. Tuhkan ja muidenkin jäteaineiden rakeistamisen vähentäisi tuntuvasti näitä ongelmia. Varastointi helpottuisi, pölyhaitta vähenisi, levitysjälki tasoittuisi ja levenisi sekä levityskoneiden tukkeutumishäiriöt vähenisivät (Hakkila & Kalaja 1983, Hakkila 1986, Silfverberg 1996). Lisäksi pelletointi antaisi mahdollisuuden muuttaa tuhkan ravinnesuhteita joko lisäämällä siihen lannoitteita tai muita jäteaineita. Pelletointi helpottaisi myös pienten tuhkaerien käyttöä.

On oletettu, että rakeistuksessa tuhka muuttuisi hitaammin liukenevaksi (Åbyhammar ym. 1994). Tämän seurauksena tuhkalannoituksesta aiheutuva 'pH-shokki' pintakasvillisuudessa ja maaperässä lieveni- si ja tuhkalannoituksen vaikutusaika todennäköisesti pitenisi (Åbyhammar ym. 1994, Mälkönen 1996, Silfverberg 1996). Kasvillisuuden shokkiin vaikuttaa myös se, että rakeinen tuhka painavampana painuisi maan pohjalle ja jäisi huomattavasti irtotuhkaa vähemmän suoraan pintakasvillisuuden päälle. Rakeistuksen etuna voisi olla myös se, että levityksen jälkeiset raskasmetallipitoisuudet maassa eivät nousisi yhtä korkeiksi kuin helpoliukoisempaa irtotuhkaa käytettäessä.

Kasvihuonekokeessa tutkittiin puutuhkasta ja tuhkan ja erilaisten jäteaineiden seoksesta valmistettujen pellettien vaikutusta rauduskoivun taimien kasvuun ja ravinnetalouteen erilaisilla kasvualustoilla. Kokeessa selvitettiin myös pelletoinnin vaikutusta taimien kasvuun ja ravinnetalouteen.

2. Aineisto ja menetelmät

Pelletoitujen (ks. Takalo 1996a,b) jäteaineiden käyttökelpoisuutta rauduskoivun taimien lannoitteeksi tutkittiin kasvihuonekokeessa. Tutkitut pelletoidut jäteaineet olivat A) puutuhka (Kannuksen Kaukolämpö) B) puutuhkan (30 %) ja Kannuksen jätevedenpuhdistamon viisi vuotta kompostoidun yhdyskuntajätteen (70 %) seos, C) puutuhkan (48 %) ja kompostoidun minkinlannan (Turkistutkimusasema) (52 %) seos, D) puutuhkan (73 %) ja teuraseläinten mahalannan (Pouuttu Oy) seos (27 %) ja E) Kannuksen jätevedenpuhdistamon viisi vuotta kompostoitua yhdyskuntajätettä (taulukko 1). Kokeessa tutkittiin myös jäteaineiden käyttömäärien vaikutusta. Käyttömäärinä tutkittiin a) 0, b) 6 t/ha, c) 12 t/ha, d) 24 t/ha ja e) 48 t/ha. Määrät laskettiin koeruukun pinta-alan perusteella. Pelletoinnin vaikutusta tutkittiin siten, että yhtenä koejäsenenä oli jauhattujen pellettien käyttö (käyttömäärätasolla 24 t/ha).

Taulukko 1. Kokeissa käytettyjen pellettien ravinnepitoisuuksia.

Jäteaine	pH	Ravinnepitoisuus										
		N %	P mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Fe mg/g	Mn mg/g	Zn mg/kg	Cu mg/kg	B mg/kg	Cd mg/kg
A Puutuhka	11,0	0,1	6,0	27,1	60,0	14,7	16,1	5,9	944	99	122	9
B Puutuhka + yhdyskuntajäte	8,3	1,4	17,0	9,0	66,5	6,5	61,2	2,5	565	153	57	4
C Puutuhka + minkinlanta	10,2	0,7	13,3	27,0	72,0	13,6	22,0	6,1	1148	92	124	9
D Puutuhka + mahalanta	11,0	0,4	8,7	36,3	78,9	18,9	19,1	8,4	1464	117	171	11
E Kompostoituu yhdyskuntajäte	8,4	1,1	15,5	9,5	59,9	6,6	48,1	2,6	714	157	52	4

Koekasveina käytettiin rauduskoivun taimia. Siemenistä (T 03–89–32 Karttula) idätettyjä koetaimia kasvatettiin ravinnepitoisuuksissa kasvuturpeessa, kunnes ne olivat noin kahden – viiden senttimetrin mittaisia.

Tutkittaviksi kasvualustoiksi valittiin puolukkatyyppin kangasmaata Kannuksesta (VT-maa), turvetta isovarpuiselta rämeeltä Kälviältä (IR-turve) ja metsitetyn turvepellon maata Toholammilta (PM-turve) (taulukko 2). Maat homogenisoitiin huolellisesti sekoittamalla niitä suurissa saaveissa. Maista otettiin näytteet ravinneanalyysejä varten. Koeruukut (koko 1,9 l) täytettiin homogenisoituilla mailla jättäen n. 10 cm pinnalta vajaiksi. Jäterakeiden kosteuspitoisuus määritettiin ja käyttömäärät laskettiin kuiva-ainetta kohti. Jäteaineet sijoitettiin ruukkuihin tasaisesti sekoittaen ne maan kanssa 10 cm:n pintakerrokseen. Ruukut täytettiin maalla. Jokaiseen ruukkuun istutettiin kaksi rauduskoivun tainta 3. – 4.7. 1995. Ruukuista poistettiin heikompi tai kuollut taimi viimeistään kuukauden kuluttua kokeen alkamisesta. Ruukkujen keskinäistä asemaa valoon nähden muutettiin kasvukauden aikana useita kertoja. Taimia kasteltiin säännöllisesti niin, että veden puute ei ollut missään kasvatuksen vaiheessa minimitekijä taimien kasvulle. Taimia kasvatettiin kokeessa kaksi ja puoli kuukautta.

Kokeessa oli kolme toistoa, jotka lohkotettiin kasvihuoneen eri osiin. Kokeessa oli yhteensä 270 koeruukua. Taimien pituus mitattiin noin kahden viikon välein. Kasvatusjakson lopussa koivuntaimet leikattiin tyvestä poikki. Taimien lehtien, versojen ja osasta käsittelyjä myös juurten kuivamassa punnittiin kuivattujen versojen ja juurien 1 vrk 105 °C:n lämpötilassa ja lehtiä n. 60 °C:n lämpötilassa. Lehdet jauhetaan ja niiden ravinnepitoisuudet (N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn, Cd, B) analysoitiin (Halonen & Tulkki 1983). Osasta käsittelyistä analysoitiin myös juurien ja versojen ravinnepitoisuuksia. Taimien lehtimassan pienen määrän vuoksi jouduttiin ravinneanalyysejä varten eri toistoista peräisin olevien taimien lehdet yhdistämään yhdeksi kokoomanäytteeksi. VT-maalla kasvaneissa taimissa oli niin vähän lehtiä, että lannoittamattomasta ja pienemmän määrän pellettejä saaneista käsittelyistä ei ravinnepitoisuuksia voitu analysoida.

Kerätty mitta- ja ravinneanalyyssiaineisto tallennettiin ja aineistosta tarkasteltiin jätteiden vaikutusta taimien kasvuun erilaisilla kasvualustoilla. Varianssianalyysillä tutkittiin jätelajin, jätemäärän ja näiden yhdysvaikutuksen tilastollista merkitsevyyttä taimista mitattuihin muuttujiin eri kasvualustoilla. Pellettoinnin vaikutusta tutkittiin vertaamalla tasolla 24 t/ha pellettien ja jauhettujen pellettien antamaa tulosta varianssianalyysillä. Koska ravinneanalyysejä varten eri toistoista olevat lehdet jouduttiin yhdistämään, varianssianalyysillä tutkittiin vain jätteiden ja niiden käyttömäärän vaikutusta lehtien ravinnepitoisuuksiin.

Taulukko 2. Kokeissa käytettyjen kasvualustojen ominaisuuksia (laboratoriotilavuutta kohti).

Ominaisuus	Suure	IR-turve	PM-maa	VT-maa
pH (H ₂ O)		4,0	5,1	4,7
N tot.	%	2,5	2,0	0,1
P tot.	mg/l	148	671	670
P AAs	"	13	13	10
K tot.	"	44	602	1454
K AAs	"	26	76	21
Ca tot.	"	557	1827	659
Ca AAs	"	438	1334	55
Mg tot.	"	82	1067	2605
Mg AAs	"	76	382	11
Mn tot.	"	3	66	117
Mn AAs	"	2	38	12
Fe tot.	"	307	5003	11680
Fe AAs	"	3	294	449
Zn tot.	"	5	22	28
Zn AAs	"	2	8	1
Cu tot.	"	1	6	6
B tot.	"	1	1	6

AAs = happamaan ammoniumasetaattiin (pH 4,65) uuttuva.

3. Tulokset

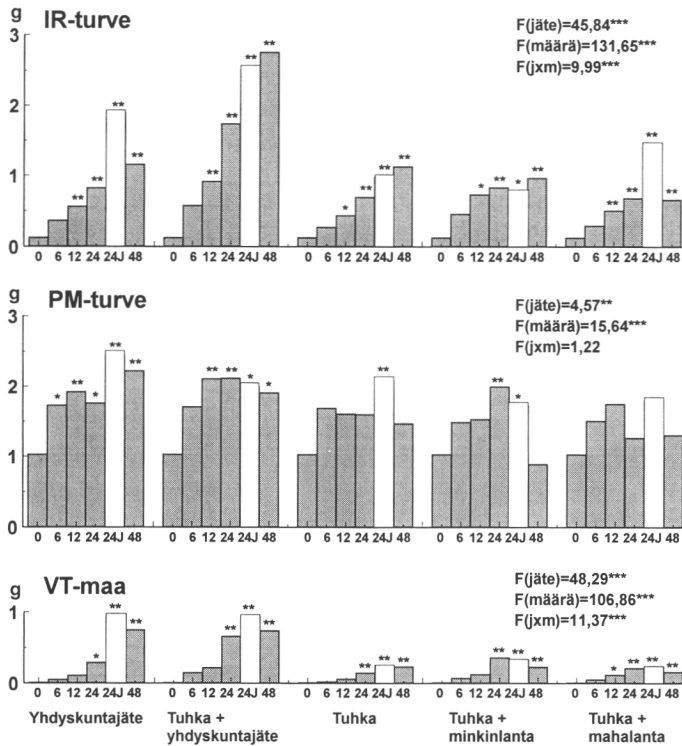
3.1. Taimien kasvu

Ilman lannoitusta rauduskoivun taimet kasvoivat huonosti sekä puolukkakankaan maassa että isovarpuisen rämeen turpeessa (kuva 1). Sen sijaan peltomaassa taimien kasvu oli muihin kasvualustoihin verrattuna minkertainen ilman lannoitusta.

Pelletit lisäsivät rauduskoivun taimien kasvua eniten isovarpuisen rämeen turpeella (kuva 1). Lannoitettujenkin taimien kasvu jäi pieneksi VT-maalla. Peltomaassa lannoituksen vaikutus oli suhteellisesti pieni, eikä kaikkien jäteaineiden kohdalla tilastollisesti merkitsevä. Myöskin käyttömäärän lisääminen paransi taimien kasvua IR- ja VT-maalla. Sen sijaan peltomaassa jo pienimmälläkin annostelutasolla saatiin useissa tapauksissa yhtä hyvä tulos kuin suurimmalla käyttömäärällä.

Jäteaineista eniten taimien kasvua lisäsivät yhdyskuntajäte ja tuhkan ja yhdyskuntajätteen seos. Näistä aineista valmistettujen pellettien typpipitoisuus oli korkein. Peltomaassa yhdyskuntajätteestä ja yhdyskuntajätteen ja tuhkan seoksesta valmistetut pelletit lisäsivät taimien kasvua eniten. Muiden jäteaineiden kohdalla kasvun lisäys oli tilastollisesti merkitsevä vain muutamassa käsittelytasossa. Peltomaassa annostelutason vaikutus oli vähäisin. Myös puolukkakankaan maassa yhdyskuntajätteestä sekä sen ja tuhkan seoksesta valmistetut pelletit lisäsivät eniten taimien kasvua. Tosin kasvun jäi pieneksi verrattuna muihin kasvualustoihin.

Käyttömäärän olleessa 24 t/ha voitiin tarkastella pelletoinnin vaikutusta vertaamalla keskenään pellettejä ja vastaavan määrän jauhettuja pellettejä saaneiden taimien kasvua (kuva 1). Pelletointi pienensi tilastollisesti merkitsevästi yhdyskuntajätteen ($F=28,87^{***}$), tuhkan ($F = 14,37^{**}$) sekä tuhkan ja mahalannan seoksen ($F = 6,73^*$) vaikutusta taimien kasvuun. Sen sijaan tuhkan ja minkinlannan seoksen kasvureaktioon pelletoinnilla ei ollut vaikutusta ($F = 0,65$).



Kuva 1. Pelletoitujen jätteiden ja annostelumäärien vaikutus rauduskoivun taimien verson kuivamassaan. J = pelletit jauhettu hienoksi (taso 24 t/ha). Vertailukäsittelystä (0 t/ha) Dunnetin testin mukaan tilastollisesti merkitsevästi eroavat keskiarvot merkitty tähdillä pylväiden päälle (* = $p < 0,05$, ** = $p < 0,01$, *** = $p < 0,001$).

Pelleteissä annettujen ravinnemäärien vaikutusta taimien kasvuun tutkittiin korrelaatioanalyysillä kullakin kasvialustalla erikseen. Tässä analyysissä jätettiin pois jauhettu koejäsen. Typen ja fosforin vaikutus oli tilastollisesti merkitsevä sekä IR-turpeella että VT-maalla. Sen sijaan pellonmetsitysturpeella, jonka typipitoisuus oli korkein taimien kasvu ei korreloinut typen eikä fosforin määrän kanssa.

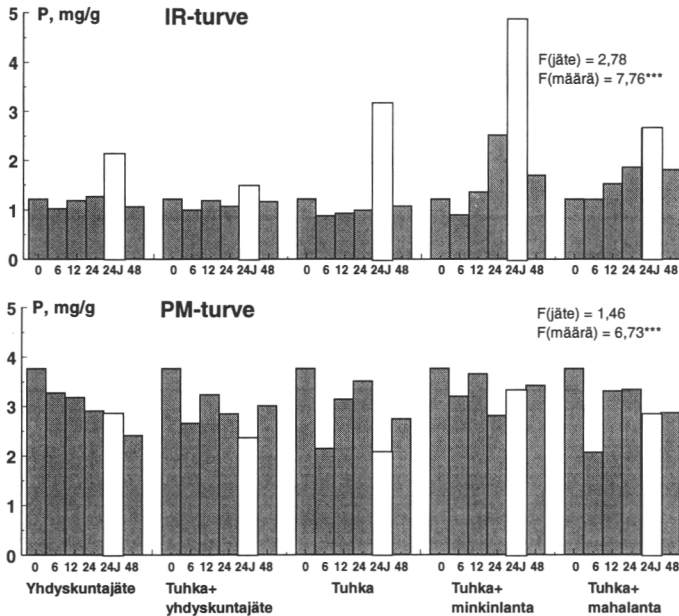
Taulukko 3. Pelleteinä annettujen ravinnemäärien ja taimien kuivamassan välinen korrelaatio eri kasvialustoilla.

Ravinne	Kasvialusta		
	IR-turpe	PM-turpe	VT-maa
N	0,779***	0,191	0,805***
P	0,715***	0,089	0,770***
K	0,099	-0,378**	0,072
Ca	0,526***	-0,164	0,509***
Mg	0,176	-0,337**	0,157

3.2. Lehtien ravinnepitoisuudet

Ravinneanalyysiä varten jouduttiin eri toistoissa kasvaneiden taimien lehdet yhdistämään. Siksi tutkittiin kaksisuuntaisella varianssianalyysillä jätelajin ja jätemäärän merkitystä. Erilaiset jätteenaineet ja niiden käyttömäärät lisäsivät lehtien kalium-, kalsium-, magnesium- ja booripitoisuuksia (kuva 2, 3, 4, liitteet 1 ja 2). Vaikutukset muihin ravinnepitoisuuksiin olivat pienemmät.

Pelletointi näytti hidastavan erityisesti fosforin liukoisuutta isovarpuisen rämeen turpeella (kuva 2). Kaikissa tapauksissa jauhetuilla pelleteillä lehtien fosforipitoisuudet kohosivat korkeammiksi kuin vertailukäsittelyssä. Sen sijaan lehtien booripitoisuuksia pelletoidut jätteenaineet nostivat enemmän kuin pellettoimattamat (kuva 4).

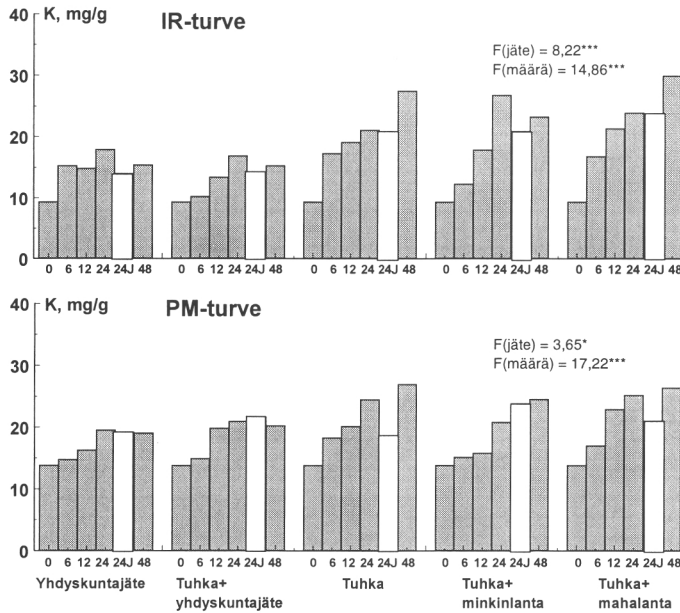


Kuva 2. Pellettoitujen jätteiden ja annostelumäärien vaikutus rauduskoivun taimien lehtien fosforipitoisuuksiin. J = pelletit jauhettu hienoksi (taso 24 t/ha).

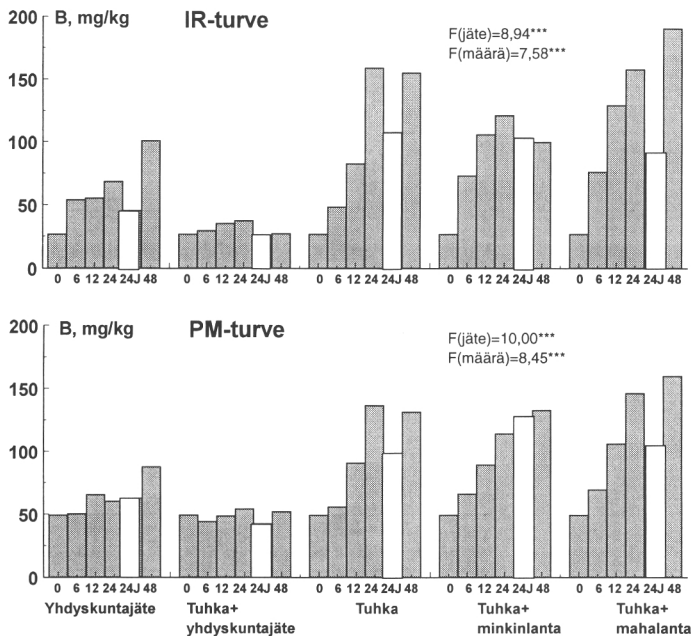
4. Tulosten tarkastelu

Kasvualustat poikkesivat kemiallisilta ja fysikaalisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti toisistaan. Eri jätteenaineista valmistetut pelletit lisäsivät taimien kasvua kaikilla kasvualustoilla. Suurin kasvun lisäys saatiin vähiten ravinteita sisältäneellä isovarpuisen rämeen turpeella. Siellä eri jätelajien suurimmat käyttömäärät lisäsivät taimien versojen massan moninkertaisiksi. Vaikutus oli pieni peltoturpeella, jossa erityisesti happamaan ammoniumasetaattiin uuttuvia ravinteita oli eniten. Yleensä pellettien käyttömäärän lisääminen lisäsi taimien kasvua.

Jätelajeista yhdyskuntajätteestä ja yhdyskuntajätteen ja tuhkan seoksesta valmistetuilla pelleteillä taimet kasvoivat parhaiten. Näissä pelleteissä oli eniten typpeä. Vaikutus oli suurin isovarpuisen rämeen turpeella, mutta näkyi myös puolukkakankaan maassa. Pelleteissä annetun typpi- ja fosforimäärän lisääntyessä taimien kasvu parani sekä isovarpuisen rämeen turpeella, että kuivahkon kankaan maalla. Sen sijaan ravinteikkaammalla pelonmetsitysturpeella näillä ravinteilla ei ollut taimien kasvua lisäävää vaikutusta.



Kuva 3. Pelletoitujen jätteiden ja annostelumäärien vaikutus rauduskoivun taimien lehtien kaliumpitoisuuksiin. J = pelletit jauhettu hienoksi (taso 24 t/ha).



Kuva 4. Pelletoitujen jätteiden ja annostelumäärien vaikutus rauduskoivun taimien lehtien booripitoisuuksiin. J = pelletit jauhettu hienoksi (taso 24 t/ha).

Vedenpuhdistamon jätelietteestä ja tuhasta valmistettuja pellettejä ovat aiemmin tutkineet kasvihuonekokeessa Moilanen ym. (1987). Heidän kokeessaan se lisäsi hyvin taimien kasvua ja heidän käyttämänsä suurin pellettimäärä (20 t/ha) näytti jäävän vielä kasvun kannalta alle optimin. Myös rakeistamaton jäteliete on lisännyt hieskoivun taimien kasvua kasvuturpeella (Moilanen ym. 1987) ja teollisuuden jäteliete energiapajujen kasvua kivennäismaan pellolla (Hytönen 1985). Myös metsäteollisuuden bioliete on lisännyt taimien kasvua kasvihuoneessa huomattavasti (Veijalainen ym. 1993). Lietteiden ongelmana voi olla niiden sisältämän kaliumin vähäisyys (Hytönen 1985, Moilanen ym. 1987, Veijalainen ym. 1993). Pellettoiminen tarjoaisi keinon täydentää lietteen ravinnepitoisuuksia, vaikkakaan tässä tutkimuksessa tuhkan lisäys ei juurikaan nostanut pellettien kaliumpitoisuutta. Pelletit nostivat useiden ravinteiden pitoisuuksia koivunlehdissä, erityisesti käyttömäärän lisääntyessä.

Pelletointi näytti jonkin verran hidastavan taimien kasvua. Erityisen selvästi tämä tuli esiin tyypeä sisältävien pellettien kohdalla sekä isovarpuisella rämeen turpeella. Pelleteillä saatu irtonaisia jätteen hitaampi alkuvaikutus ei liene niiden käytön kannalta haittatekijä. Päinvastoin, hidastavuus olisi etu kun tarkastellaan ravinteiden huuhtoutumista ja lannoituksen vaikutusajan pituutta. Pelletoinnilla lienee ravinteiden liukoisuutta hidastavaa vaikutusta. Lehtianalyysien perusteella arvioituna pelletointi näytti hidastavan fosforin käyttökelpoisuutta isovarpuisen rämeen turpeella.

Kasvihuonekokeen tulosten perusteella pelletit soveltuvat käytettäväksi metsänlannoitukseen ja maanparannukseen ja tarjoavat mahdollisuuden säädellä ravinnepitoisuuksia erilaisia jätteen yhdistelmällä.

Kirjallisuus

- Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599. 65 s.
- Hakkila, P. 1986. Recycling of wood and bark ash. A state-of-the-art review for programme group C under the IEA forest Energy Agreement. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 211. 44 s.
- & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. *Folia Forestalia* 552. 37 s.
- Halonen, O., Tulkki, H. & Derome, J. 1983. Nutrient analysis methods. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 121. 28 s.
- Hytönen, J. 1985. Teollisuuslietteellä lannoitetun vesipajun lehdetön maanpäällinen biomassatuotos. Abstract: Leafless above-ground biomass production of *Salix 'Aquatica'* fertilized with industrial sludge. *Folia Forestalia* 614. 16 s.
- Moilanen, M., Ferm, A. & Issakainen, J. 1987. Kasvihuonekokeita erilaisten jätteen vaikutuksesta hieskoivun alkukehitykseen turvealustalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 281. 36 s.
- Mälkönen, E. 1996. Tuhka kangasmetsien lannoitteena. Teoksessa: Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 21 – 26.
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 588. 27 s.
- Takalo, S. 1996a. Tuhka ja puhdistamoliete rakeiksi. Teoksessa: Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599:35–37.
- 1996b. Jätteet rakeistamalla hyötykäyttöön. Teoksessa: Kangas, J. & Heino, E. (toim.) Metsätalouden ympäristövaikutukset ja niiden arviointi. Metsäntutkimuspäivä Perhossa 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 611:73–75.

Veijalainen, H., Silfverberg, K & Hytönen, J. 1993. Metsäteollisuuden bioliete ja kivihiilen tuhka rauduskoivun taimien ravinnelähteenä. Summary: Pulp biosludge and coal ash as nutrient sources for silver birch seedling. Suo 44(3):63–73.

Åbyhammar, T., Fahlin, M., Nilsson, A. & Henfridsson, U. 1994. Askaäterföringssystem. Delprojekt 1: Tekniker och möjligheter. NUTEK R 194:3. 41 s.

Liite 1. Koivuntaimien lehtien ravinnepitoisuudet.

Jäte	Taso, t/ha	N %	P mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Al mg/kg	Cd mg/kg	B mg/kg
IR-maa													
0	0	2,31	1,22	9,35	4,64	4,92	923	92	396	23,8	57	1,8	26,8
Yhdys-	6	2,16	1,03	15,26	5,93	4,02	575	107	333	11,2	23	1,4	54,0
kunta-	12	1,90	1,18	14,83	6,99	3,96	662	75	299	11,1	57	1,4	55,3
täte	24	2,03	1,27	17,92	6,42	3,93	627	82	353	10,1	66	1,5	68,5
	24j	1,42	2,12	13,98	7,61	3,52	900	69	295	6,5	64	1,3	45,2
	48	1,59	1,07	15,40	6,42	4,06	486	97	237	9,3	124	1,7	100,7
Tuhka	6	1,78	1,00	10,23	5,54	3,54	671	75	320	10,8	16	1,3	29,5
+	12	1,62	1,19	13,42	5,55	3,56	795	74	304	29,0	88	1,3	35,0
yhdys-	24	1,96	1,07	16,89	6,39	3,50	443	69	218	7,50	99	1,2	37,4
kunta-	24j	1,34	1,50	14,29	6,01	2,51	430	46	134	5,8	51	0,8	26,1
jäte	48	1,94	1,16	15,28	4,84	3,29	379	67	172	6,7	92	0,9	27,2
Tuhka	6	2,82	0,88	17,27	4,10	3,45	763	73	418	16,5	27	1,4	48,4
	12	2,37	0,93	19,10	4,42	3,35	938	74	401	30,6	110	1,6	82,7
	24	1,88	0,99	21,07	4,36	3,20	1082	68	339	13,6	115	1,4	159,0
	24j	1,98	3,17	20,76	5,89	3,69	2808	86	328	16,6	118	2,1	107,5
	48	2,01	1,07	27,43	3,71	2,72	902	85	351	9,2	167	1,4	155,1
Tuhka	6	1,74	0,90	12,27	4,41	4,08	1133	79	362	17,9	144	1,3	73,0
+	12	2,22	1,36	17,85	4,35	4,74	885	90	262	19,8	43	1,1	105,7
min-	24	2,65	2,52	26,77	4,43	4,68	928	86	287	27,6	120	1,2	121,2
kin	24j	2,60	4,87	20,88	4,76	4,12	1818	74	362	11,9	47	1,7	103,3
lanta	48	2,30	1,70	23,26	2,61	3,40	607	87	241	21,9	153	0,5	99,8
Tuhka	6	1,74	1,21	16,81	4,71	4,28	921	88	388	16,2	199	1,2	76,0
+	12	1,97	1,53	21,36	3,68	3,68	961	127	347	18,8	71	1,5	129,1
maha-	24	1,58	1,87	23,93	3,45	3,13	684	95	247	10,4	75	1,2	157,7
lanta	24j	1,66	2,67	23,82	4,22	3,75	1245	69	272	26,1	99	1,4	91,2
	48	2,36	1,82	29,95	2,21	2,93	636	96	203	10,1	136	0,9	190,1
PM-maa													
0	0	2,23	3,77	13,82	8,41	5,62	1142	144	611	14,1	55	1,6	49,2
Yhdys-	6	1,91	3,27	14,78	8,12	5,60	969	156	492	11,8	45	1,2	50,3
kunta	12	2,60	3,18	16,29	7,29	5,25	972	154	653	10,9	62	1,4	65,6
jäte	24	2,93	2,91	19,55	7,10	4,90	945	158	663	12,3	11	1,4	60,5
	24j	3,20	2,85	19,14	7,56	4,69	768	155	560	10,7	93	1,5	62,6
	48	2,96	2,41	19,04	6,72	4,73	972	160	572	13,9	29	1,3	87,7
Tuhka	6	1,96	2,66	14,96	8,13	5,24	865	115	518	9,0	28	1,2	44,1
+	12	3,32	3,23	19,84	7,41	4,70	728	206	588	30,6	98	1,5	48,6
yhdys-	24	3,23	2,84	20,96	6,93	4,80	893	180	605	12,1	103	1,3	54,2
kunta-	24j	3,41	2,37	21,68	6,62	4,04	686	159	496	12,9	165	1,0	42,3
jäte	48	3,61	3,01	20,24	6,49	4,51	923	175	599	39,1	137	1,3	52,1
Tuhka	6	1,94	2,15	18,30	6,85	4,37	741	172	451	9,7	109	1,0	55,9
	12	2,60	3,14	20,17	6,80	4,58	884	159	595	16,3	37	1,5	91,0
	24	3,28	3,52	24,50	6,59	4,79	1232	211	627	29,0	55	1,7	136,8
	24j	2,62	2,07	18,70	6,61	4,94	817	142	492	11,9	69	1,3	98,6
	48	3,70	2,74	26,92	4,88	4,04	925	146	593	13,2	172	1,8	131,6

Jäte	Taso t/ha	N %	P mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mg mg/g	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Zn mg/kg	Cu mg/kg	Al mg/kg	Cd mg/kg	B mg/kg
Tuhka	6	2,06	3,21	15,16	7,69	5,04	895	143	538	25,9	104	0,8	66,1
+ min-	12	2,26	3,66	15,82	7,92	5,97	1022	145	638	33,4	118	1,1	89,5
kin-	24	2,34	2,81	20,84	5,60	4,28	800	126	498	11,7	102	1,1	114,3
lanta	24j	3,27	3,33	23,83	5,95	4,64	752	142	638	14,1	27	1,6	128,2
	48	3,05	3,43	24,51	4,76	4,55	821	158	457	11,0	66	1,0	132,8
Tuhka	6	1,79	2,07	17,02	5,95	4,05	762	147	477	13,9	148	1,2	69,6
+ maha-	12	2,58	3,31	22,90	6,74	4,88	1086	182	596	11,2	138	1,7	106,5
lanta	24	2,71	3,35	25,22	5,11	3,94	1131	184	649	17,5	178	1,8	146,4
	24j	3,84	2,85	21,05	4,97	4,20	905	140	573	14,0	97	2,5	104,7
	48	3,79	2,87	26,42	4,39	3,65	1544	157	767	11,7	43	2,7	160,1
VT-maa													
Yhdys-	24	1,99	2,74	17,22	5,86	4,43	1057	260	346	19,2	247	2,7	48,9
kunta-	24j	1,58	1,76	14,10	8,11	4,07	626	155	296	29,7	168	1,6	42,0
jäte	48	2,35	1,68	18,38	5,95	4,47	680	186	363	12,7	177	2,7	62,8
Tuhka	6	1,34	2,16	11,55	6,61	4,34	1165	140	400	23,3	180	2,6	
+ yhdys-	12	1,67	1,97	10,42	6,23	4,51	1019	198	399	9,2	153	2,5	35,2
kunta-	24	2,07	2,64	16,17	7,00	4,92	1024	162	374	13,7	115	2,7	39,6
jäte	24j	1,66	2,12	11,30	7,06	4,13	517	131	244	7,1	72	1,6	38,8
	48	3,29	2,13	21,07	7,0	4,50	571	380	388	34,6	123	2,3	36,4
Tuhka	24	1,76	3,54	26,74	4,38	3,62	2220	204	435	8,17	205	10,4	
+ min-	24j	1,27	2,51	14,49	5,61	4,09	1374	264	269	11,6	256	6,7	70,5
kinlnata	48	1,98	2,39	27,02	3,10	3,11	1092	173	290	14,19	251	4,2	
Tuhka	24	1,77	2,78	18,99	3,74	5,30	1579	311	334	17,87	271	2,7	130,9
+ min-	24j	1,77	2,70	17,00	4,52	4,87	954	145	258	14,22	146	2,1	82,8
kinlnata	48	1,76	2,03	27,58	2,519	5,31	1650	753	368	13,11	171	3,2	102,2
Tuhka	12	1,79	3,16	16,00	3,67	4,06	2163	281	471	25,22	294	6,1	
+ ma-	24	1,87	2,51	26,91	2,83	3,18	2084	724	374	14,29	403	4,3	
halanta	24j	2,12	2,68	21,33	5,01	4,83	1411	332	296	10,79	371	3,0	112,6
	48	2,57	2,28	39,14	2,37	4,01	1611	556	546	13,88	463	3,7	

Liite 2. Jätelajin ja jätemäärän vaikutus koivun lehtien ravinnepitoisuuksiin isovarpuisen rämeen (IR) turpeella ja pellonmetsitysturpeella (PM). Varianssianalyysin tulokset.

Ravinne	F-jäte- laji		F-jäte- määrä	
	IR	PM	IR	PM
N	2,41	1,64	1,26	17,10***
P	2,78	1,46	7,76***	6,73***
K	8,22***	3,65*	14,86***	17,22***
Ca	13,21***	7,66***	3,43*	17,32***
Mg	4,33*	3,40***	10,27***	7,96***
Mn	3,22*	2,03	3,37*	3,97*
Fe	3,28*	1,09	2,27	2,02
Zn	4,98**	0,74	8,27***	2,89*
Cu	2,05	0,93	3,70*	0,68
Al	1,34	0,84	2,17	0,72
Cd	2,60	4,61**	4,58**	2,16
B	8,94***	10,00***	7,58***	8,45***

Tuhkapellettien kestävyys maastossa ja varastoinnissa

Jyrki Hytönen & Tero Takalo

1. Johdanto

Puuta ja turvetta poltettaessa syntyvä tuhka on energialaitoksille jäte, joka pääasiassa päätyy läjitysalueille tai kaatopaikoille. Tuhkassa on kuitenkin todettu hyväksi metsänlannoitteeksi, joka sisältää tyypeä lukuunottamatta kaikkia puiden tarvitsemia ravinteita oikeissa suhteissa (Silfverberg 1996). Tuhkan levittämällä metsiin palautettaisiin sinne ravinteita, jotka ovat puunkorjuussa metsästä poistuneet. Tuhkalla on lisäksi voimakas kalkitusvaikutus.

Irtotuhkan käsittely ja levitys on hankalaa. Suuri ongelma on irtotuhkan pölyäminen. Hengityselimistöön ja iholle joutuva pöly ja raskasmetallipitoisuudet saattavat koitua vaaraksi työntekijän terveydelle (Juntunen 1982, 1983) ja levityskoneissa tuhka voi aiheuttaa ennen aikaista kulumista ja syöpymistä (Hakkila & Kalaja 1983, Hakkila 1986). Myöskin hienojakoisella tuhalla tasaisen levitysjäljen aikaansaaminen saattaa tuottaa vaikeuksia. Puutuhkan palauttaminen metsiin laajemmassa mittakaavassa edellyttää erityisesti rakeistukseen ja levitykseen liittyvää teknistä kehitystyötä (Finér ym. 1996) ja rakeistus on ilmeisesti välttämätön perusedellytys tuhkan laajamittaiselle käyttöönotolle (Mälkönen 1996). Se helpottaisi varastointia, vähentäisi pölyhaittaa, tasoittaisi ja leventäisi levitysjälkeä ja vähentäisi levityskoneiden tukkeutumishäiriöitä (Hakkila & Kalaja 1983, Hakkila 1986). Lisäksi pelletointi antaisi mahdollisuuden muuttaa tuhkan ravinnesuhteita joko lisäämällä siihen lannoitteita tai muita jätteaineita (esim. Ferm & Takalo 1981). Pienten tuhkaerien käyttö olisi helpompaa kun käytettäisiin pelletoitua tuhkaa.

Tuhkan ja muiden jätteaineiden rakeistamistutkimuksiin liittyy oleellisesti rakeiden käyttökelpoisuuden selvitys. On oletettu, että rakeistuksessa tuhka muuttuisi hitaammin liukenevaksi. Tämän seurauksena tuhkalannoituksesta aiheutuva 'pH-shokki' pintakasvillisuudessa ja maaperässä lievenisi (Mälkönen 1996, Silfverberg 1996). Kasvillisuuden shokkiin vaikuttaa myös se, että rakeinen tuhka painavampana painuisi maan pinnalle, jolloin sitä jäisi huomattavasti irtotuhkaa vähemmän suoraan pintakasvillisuuden päälle. Rakeistuksen etuna voisi olla myös se, että levityksen jälkeiset raskasmetallipitoisuudet maassa eivät nousisi yhtä korkeiksi kuin heppoliukoista irtotuhkaa käytettäessä. Jotta pelletoinnista saavutettaisiin siitä kaavailtuja etuja, pellettien olisi myös kestävä pitkäaikaista varastointia ilman, että ne muuttuvat ennen levitystä.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää tuhkasta ja erilaisista jättemateriaaleista valmistettujen pellettien kestävyttä maastossa ja varastoinnissa.

2. Aineisto ja menetelmät

2.1 Kestävyys maastossa

Pellettien kestävyuden ja hajoamisnopeuden selvittämiseksi perustettiin kaksi maastokoetta. Pelletteja valmistettiin telamatriisipuristimella (ks. Takalo 1996a,b). Eri materiaaleista valmistettuja pellettejä suljettiin verkkopusseihin (silmäkoko 1 mm x 1,5 mm), jotka sijoitettiin metsään aivan maanpintaan. Tavoitteena oli, että pelletit maastossa sijaitsisivat lähellä maanpintaa, kuten luultavasti kävisi koneellisen levityksenkin jälkeen. Ennen verkkopusseihin sulkemista pellettien kuivamassa punnittiin. Kokeessa seurattiin pellettien massan muutosta pääasiassa kuukauden välein tehdyillä mittauksilla.

Kokeessa tutkittiin viittä erilaista pellettiä, joiden raaka-aineet olivat:

1. Tuhka 1 (36 %) + tuhka 2 (64 %)
2. Tuhka 2 (91 %) + tuore jätevedenpuhdistamon liete (9 % kuivana)
3. Tuhka 1 (87,5 %) + bioliete (12,5 %)
4. Tuhka 1 (73 %) + viherlipeäsakka (27 %)
5. Tuhka 2 (50 %) + kananlanta (50 %)

Tuhka 1 oli puutuhkaa Wisaforest Oy:ltä Pietarsaaresta ja tuhka 2 puutuhkaa Kannuksen Kaukolämpö Oy:ltä. Viherlipeäsakka ja bioliete olivat peräisin Wisaforest Oy:ltä Pietarsaaresta ja liete Kannuksen jätevedenpuhdistamolta.

Koe perustettiin Kannukseen puolukkatyyppin kangasmaalle (VT) ja isovarpuiselle rämeelle (IR). Jokaista pellettierää sijoitettiin maastoon molemmille kasvupaikoille kolme toistoa. Yhteensä kokeeseen kuului 180 verkkopusseihin suljettua pellettierää. Koe aloitettiin sijoittamalla koe-erät maastoon mahdollisimman lähelle maanpintaa 1.7.1996. Mittausta varten pusseja otettiin vuoden 1996 heinäkuun, elokuun, syyskuun ja lokakuun lopussa ja vuoden 1997 toukokuun puolivälissä ja syyskuun alussa.

Pelleteistä (tuhka+bioliete ja tuhka1+tuhka 2) analysoitiin typpi-, fosfori-, kalium-, kalsium- ja mangesiumpitoisuudet (Halonen ym. 1983) kokeen alussa sekä vuoden ja neljän kuukauden maastossaoloajan jälkeen.

Ilmatieteen laitoksen Nivalan säähavaintoasemalla sademäärät olivat vuoden 1996 heinäkuussa 123 mm, elokuussa 25 mm, syyskuussa 19 mm ja lokakuussa 37 mm. Heinäkuun sademäärä oli kaksinkertainen pitkän ajan keskiarvoon (1961 – 1990) verrattuna (67 mm) ja elo- ja syyskuun sademäärät puolestaan kolme kertaa pienempiä kuin pitkän ajan keskiarvo. Vuonna 1997 satoi toukokuussa 31 mm, kesäkuussa 61 mm ja heinäkuussa 59 mm.

Yksisuuntaisella varianssianalyysillä tutkittiin poikkeavatko eri pellettierien massojen alenemiset kokeen lopussa toisistaan. Tukeyn testillä tutkittiin keskiarvojen merkitseviä eroja.

2.2 Kestävyys varastoinnissa

Kuivauksen ja varastoinnin vaikutuksen selvittämiseksi pellettien laatuun perustettiin koe, jonka tarkoituksena oli tutkia ulkovarastoinnin (kolme varastointiaikaa) vaikutusta kosteudeltaan erilaisten (kolme kosteutta) pellettien lujuteen ja raekokoon.

Koetta varten valmistettiin pellettejä (halkaisija 8 mm, pituus 5 – 15 mm) Kannuksen tutkimus- asemalla kehitetyllä telamatriisipohjaisella puristimella (ks. Takalo 1996a,b) puutuhkasta (Wisaforest Oy:ltä Pietarsaaresta). Prosessissa tuhkan kosteus oli 17,2 %. Pelletit kuivattiin kolmeen eri kosteuteen:

1. Kuivaamaton, kosteus 15,0 %.
2. Puolikuiva, kosteus 8,9 %.
3. Kuiva, kosteus 2,0 %.

Kuivauksen jälkeen pelleteistä mitattiin puristuslujuus sähkökäyttöisellä mittausrämeellä (Kahl-Pellettester), sekä seulottiin niistä alle 6,3 mm kokoiset jakeet käsikäyttöisellä seulalla. Pellettejä suljettiin kaksinkertaisiin muovipusseihin noin 1 kg (kuivamassa) kuhunkin. Pussit asetettiin vieretysten 91 x 57 cm kokoiselle lavalle ja peitettiin levyllä. Levyn päälle asetettiin paino (520 kg). Koepussien päälle asetettu levy ohjasi painon tasaisesti kaikkien koe-erien päälle. Pelletit varastoitettiin helmikuussa ulkoilmaan, sateelta suojattuun kuivaan paikkaan.

Kokeessa oli kolme toistoa. Otannat tehtiin kuukauden (maaliskuu), kolmen kuukauden (toukokuu) ja kuuden kuukauden (elokuu) varastoinnin jälkeen. Pelleteistä mitattiin puristuslujuus (10 – 15 pellettiä

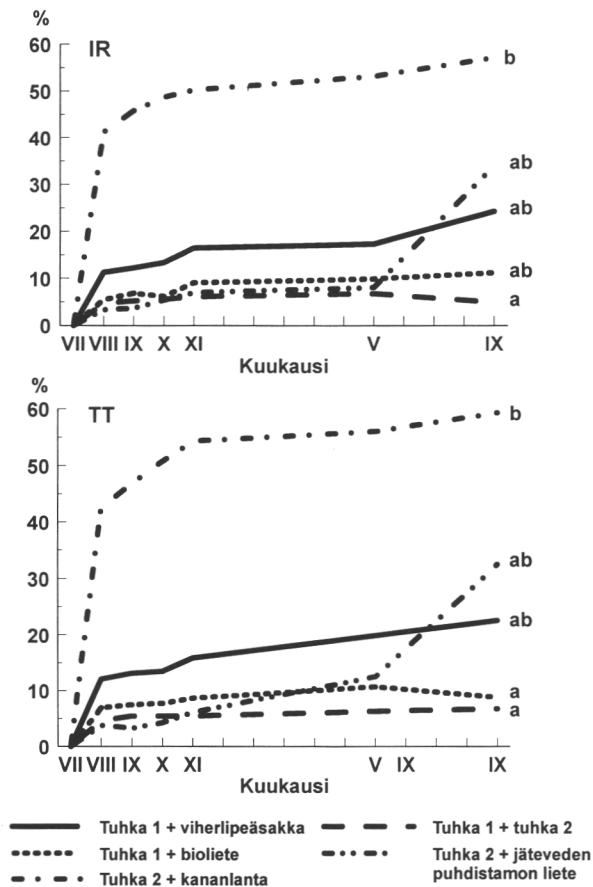
jokaisesta pussista), kosteus (infrapunavalokuivaus) ja raekoko (sarjaseulontakone, DIN 4188). Seulonnassa erotettiin alle 6,3 mm, 2,0 ja 0,63 mm:n kokoiset rakeet. Lisäksi selvitettiin ylrakeiden (>20 mm) määrä, mikä kertoi pellettien paakkuuntumisesta. Seulontajäännösten massa punnittiin. Lisäksi arvioidaan silmä­määräisesti pellettien paakkuuntumista.

Yksisuuntaisella varianssianalysillä tutkittiin varastoinnin vaikutusta pellettien ominaisuuksiin. Keskiarvojen välisten erojen tilastollista merkitsevyyttä tutkittiin Tukeyn testillä.

3. Tulokset

3.1. Kestävyys maastossa

Pellettien massa aleneminen oli suurinta ensimmäisen kuukauden aikana maastossa (kuva 1). Tämän jälkeen muutokset olivat hitaampia. Kun pelletit koostuivat tuhkasta, niiden massa aleni vuoden ja kahden kuukau­den aikana kankaalla ja suolla 5 – 7 %. Tuhkapelletit olivat siis hyvin kestäviä. Suuri orgaanisen aineen määrä (lanta tai liete) sen sijaan näyttösi nopeuttavan pellettien liukenemista. Erityisen nopeasti ovat hajon­neet pelletit, joissa on käytetty kananlantaa. Niiden massa aleni seurantajakson aikana 57 – 59 %.



Kuva 1. Pellettien massan aleneminen (% alkupainosta) maastokokeessa kangasmaalla (VT) ja suolla (IR). Samalla kirjaimella merkityt viimeisen mittauskerran tulokset, jotka eivät poikkea toisistaan tilastollisesti merkitsevästi Tukeyn testin mukaan ($p < 0,05$) riskillä.

Lähes kaikki pelletit olivat säilyneet koko seurantajakson ajan kovina, kiinteinä pelletteinä, eivätkä olleet murentuneet pienemmiksi osasiksi verkkopussin sisälle. Ainoastaan pelletit, jotka sisälsivät tuhkan lisäksi kananlantaa tai jätevedenpuhdistamon lietettä murentuivat verkkopussiin. Kananlantaa sisältävien pellettien puristuslujuus oli jo kuukauden säilytyksen jälkeen hyvin pieni. Tuhkaa ja lietettä sisältävien pellettien suuri massan aleneminen kokeen lopussa johtunee pellettien murenemisestä (kuva 1).

Suolla pellettien massa aleni hieman enemmän kuin kangasmaalla, vaikkakin erot ovat hyvin pieniä.

Pellettien kaliumpitoisuus aleni säilytyksen aikana 4 – 5 kertaiseksi alkutilanteeseen verrattuna (taulukko 1). Pellettien fosfori- ja kalsiumpitoisuudet nousivat hieman. Näidenkin ravinteiden kokonaismäärä pelletteissä laski, kun huomioidaan pellettein massan aleneminen kokeen aikana.

Taulukko 1. Pellettien ravinnepitoisuudet kokeen alussa sekä vuoden ja neljän kuukauden kuluttua.

Tunnus	Pitoisuus kokeen alussa	Pitoisuus kokeen lopussa		F-arvo
		Suo	Kivennäismaa	
Tuhka 1+ tuhka 2				
P, mg/g	11,5	12,0	12,1	4,2
K, mg/g	26,0	5,7	5,5	9653,6***
Ca, mg/g	147,7	149,4	151,6	2,8
Mg, mg/g	15,4	13,8	13,2	34,4***
Tuhka + bioliete				
P, mg/g	14,6	15,8	15,8	50,7***
K, mg/g	47,6	11,9	11,5	18882,0***
Ca, mg/g	198,1	203,7	206,1	21,4**
Mg, mg/g	19,8	18,0	18,0	25,7**

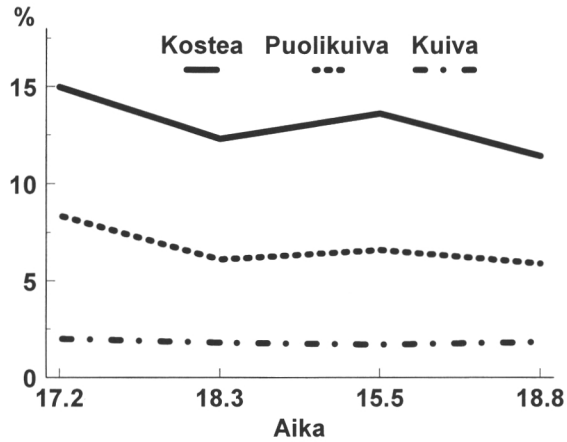
3.2. Kestävyys varastoinnissa

Pellettien kosteus muuttui vain vähän varastoinnin aikana (kuva 2). Tämä johtui säilytyksestä suljetuissa muovipusseissa, joista kosteuden haihtuminen on vähäistä. Kuivaamattomien ja puoli-kuivattujen pellettien kosteudet olivat laskeneet noin 2,5 – 3,5 %-yksikköä kuivien pellettien kosteuden pysyessä lähes ennallaan.

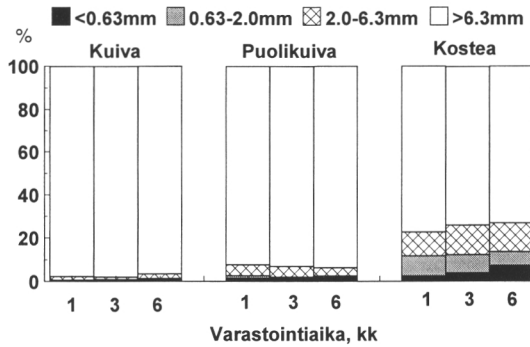
Varastointi ja erityisesti varastoitavan materiaalin kosteus vaikuttivat pellettien raakoostumuksen muutokseen varastoinnin aikana (kuva 3). Kuivat ja puolikuivat pelletit kestivät varastoinnin hyvin. Niiden raakoostumus muuttui vain vähän. Sen sijaan kuivaamattomien (kosteus 15 %) pellettien alirakeen määrä lisääntyi paljon ja se oli kokeen lopussa noin 27 %. Kosteiden pellettien raakoostumus poikkesi tilastollisesti merkittävästi puolikuivien ja kuivien pellettien raakoostuksesta.

Vasta viimeisellä mittauskerralla esiintyi yllätyksiä l. rakeiden paakkuuntumista. Tätä esiintyi vain kaikkein kosteimmassa pellettierässä. Yllätyksen määrä oli keskimäärin 20,9 %. Yllätykset murenevivat kuitenkin helposti takaisin pelleteiksi.

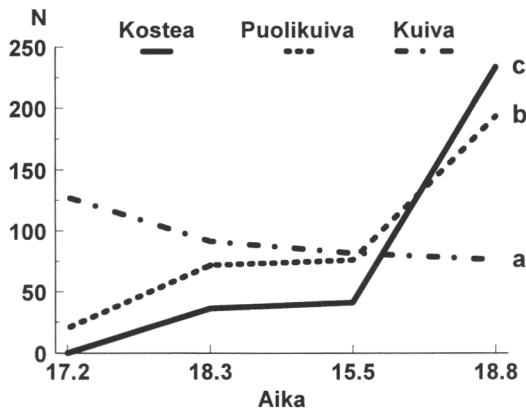
Kuivien pellettien puristuslujuus laski hieman koko varastoinnin ajan (kuva 4). Yllättävää oli puolikuivien ja kosteiden pellettien puristuslujuuden lisääntyminen. Erityisesti lämpimän kesän aikana näiden puristuslujuus kasvoi erittäin suureksi, jopa yli kaksinkertaiseksi kuivattuihin pelletteihin verrattuna. Lujuu-den muutos ei liittynyt kosteuden muutokseen, sillä pellettien kosteus pysyi lähes samana koko varastointi-jakson ajan. Viimeisellä mittauskerralla pellettien puristuslujuudet poikkesivat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ($F= 174,68^{***}$).



Kuva 2. Varastoinnin vaikutus pellettien kosteuteen.



Kuva 3. Pellettien raekoostumuksen muutos varastoinnin aikana.



Kuva 4. Pellettien puristuslujuuden muutos varastoinnin aikana. Samalla kirjaimella merkityt viimeisen mittauksen keskiarvot, jotka Tukeyn testin mukaan eivät poikkea tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,05$) toisistaan.

4. Tarkastelu

Pelletit osoittautuivat maasto-olosuhteissa yli vuoden tutkimusaikana varsin kestäviksi. Ne näyttävät hajoavan maastossa melko hitaasti. Pellettien massa voi alentua joko pellettien raaka-aineen liukenemisen tai pellettien mekaanisen murenemisen kautta. Mekaanisesti murentuneiden pelletin osien oli, poistukseen verkkopussista, oltava verkkopussin silmäkokoa pienempiä (1 mm x 1,5 mm). Lähes kaikki pelletit olivat säilyneet pelletteinä, eivätkä olleet murentuneet pienemmiksi osiksi verkkopussin sisälle. Ainoastaan tuhkaa ja kananlantaa sekä tuhkaa ja jätevedenpuhdistamon lietettä sisältävät pelletit olivat seurannan aikana murentuneet verkkopussin sisälle. Pelletit, joissa oli puolet kananlantaa murenivat jo kuukauden säilytyksen jälkeen, mutta puhdistamolietettä sisältävät pelletit vasta oltuaan vuoden maastossa. Näyttää siltä, että mikäli pelletissä on mukana runsaasti orgaanista ainetta sen hajoaminen nopeutuu huomattavasti.

Erityisesti tuhkapelletit ja runsaasti tuhkaa sisältävät pelletit hajoavat hitaasti. Tuhkapellettien hidas hajoaminen viittaa myös hitaampaan ravinteiden liukoisuuteen pelletteistä. Tosin pellettien kaliumpitoisuus oli alentunut maastossa huomattavasti alkutilanteeseen verrattuna. Sen sijaan fosfori- ja kalsiumpitoisuudet olivat jopa hivenen nousseet, vaikkakin näidenkin ravinteiden määrä pelletteissä oli vähentynyt. Siten pelletit näyttävät toteuttavan pelletoinnille biologisesti asetettuja toiveita. Pelletointi vähentäisi suurten irtotuhkakerien käytössä haitallista pH-shokkivaikutusta (Mälkönen 1996) sekä kasvillisuuteen että maahan. Pelletointi samoin voisi irtotuhkaa hitaamman liukoisuuden takia vähentää maan raskasmetallipitoisuuksien nousua levytyksen jälkeen (Hakkila & Fredriksson 1996, Mälkönen 1996). Puut saavat ravinteita pitkän ajan kuluessa samalla kun riski ravinnehuuhtoutumiin vesistöihin minimoituu.

Pellettien kestävyyyteen vaikuttaa ilmeisesti hyvin paljon säätila. Heinäkuu oli hyvin sateinen ja elokuu puolestaan hyvin vähäsateinen. Sääoloista johtuneen pellettien nopea massan aleneminen heti kokeen alussa, heinäkuussa. Sen sijaan myöhemmin pellettien massa on vähentynyt hyvin vähän. Ilmeisesti suuremmasta kosteudesta johtuen suolla pelletit hajosivat hivenen nopeammin kuin kangasmaalla.

Pelletit osoittautuivat myös varastoinnin kannalta hyvin kestäviksi. Kosteuden muutokset suljetuissa muovipusseissa olivat pieniä. Mikäli varastoidaan kosteita pellettejä näyttää varastoinnin aikana pellettien hajoaminen (alirakeisuus) kuitenkin lisääntyvän ja hienoaineksen määrä kasvavan. Tämä vaikuttanee pellettien levytykseen. Sen sijaan puolikuivattujen sekä kuivattujen pellettien raakoostumuksen muutokset varastoinnin aikana olivat pieniä. Tämän perusteella näyttäisi siltä, että pellettien kuivaaminen täysin kuivaksi ei ole tarpeen. Sen sijaan pellettien hetkellinen lämmittäminen silloin, kun ainesosana on erilaisia jätelietteitä voi olla tarpeen mikrobitoiminnan pysäyttämiseksi.

Kuivaamattomien ja puolikuivattujen pellettien puristuslujuus nousi kesän aikana paljon. Nousun syynä lienee itsekovettuminen.

Pellettien paakkuuntuneisuutta ilmeni kuivaamattomien pellettien kohdalla. Maaliskuussa pelletit olivat jäätyneet kiinni toisiinsa, mutta jo muutaman minuutin sulatuksen jälkeen ne irtoutuivat toisistaan. Elokuussa pelletit olivat muodostuneet yhdeksi paakuksi, joka mureni kuitenkin hyvin helposti pelleteiksi.

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat 2 ja 9 %:seksi kuivatun tuhkapelletin ominaisuuksien pysyvän hyvänä ulkovarastoinnissa suljetuissa pusseissa. Näyttäisi siltä, että kallista kuivausta voidaan vähentää, jolloin tuotantokustannukset alenevat. Jatkossa olisi tärkeää selvittää paperi- ja kangassäkkien soveltuvuutta puolikuivattujen- ja kuivaamattomien pellettien varastointiin.

Kirjallisuus

- Ferm, A. & Takalo, S. 1981. Tuhka ja puhdistamoliete – jätteitä vai hyödyksi metsälle. *Metsä ja Puu* 10:10–11.
- Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599. 65 s.

- Hakkila, P. 1986. Recycling of wood and bark ash. A state-of-the-art review for programme group C under the IEA forest Energy Agreement. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 211. 44 s.
- & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. Folia Forestalia 552. 37 s.
- Halonen, O., Tulkki, H. & Derome, J. 1983. Nutrient analysis methods. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 121. 28 s.
- Juntunen, M-L. 1982. Tuhkan levityksen terveydellisten haittojen arviointi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 62. 17 s.
- 1983. Lannoitetuhkan pölyä. Teho 3:26–28.
- Mälkönen, E. 1996. Tuhka kangasmetsien lannoitteena. Teoksessa: Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 21–26.
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 588. 27 s.
- Takalo, S. 1996a. Tuhka ja pudistamoliete rakeiksi. Teoksessa: Finér, L., Leinonen, A & Jauhiainen, J. 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599:35–37.
- 1996b. Jätteet rakeistamalla hyötykäyttöön. Teoksessa: Kangas, J. & Heino, E. (toim.) Metsätalouden ympäristövaikutukset ja niiden arviointi. Metsäntutkimuspäivä Perhossa 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 611:73–75.

Tuhkalannoituksen erilliskannattavuus

Risto Lauhanen, Mikko Moilanen, Klaus Silfverberg, Heikki Takamaa & Jorma Issakainen

1. Johdanto

Suomessa syntyy vuosittain yli 200 000 tonnia teollisuuden ja energialaitosten tuottamaa puu- ja turvetuhkaa (Wihersaari 1996). Tuhka on hyvä maanparannusaine keskiviljavilla tai sitä paremmilla ojitetuilla soilla sekä metsitetyillä turvepelloilla. Tuhka vähentää maan happamuutta sekä kompensoi puunkorjuun mukana pois kulkeutuneita ravinteita (mm. Hakkila ja Kalaja 1983, Silfverberg 1996).

Tuhka parantaa suometsien kasvua. Silfverbergin ja Huikarin (1985) mukaan turvemaiden mäntypuustoissa tuhkamäärä 4 – 8 t/ha tuotti kasvunlisäksi keskimäärin 3 m³/ha/a 30 – 40 vuoden aikana. Metsäntutkimuslaitoksen pitkäaikaisissa kasvu- ja tuotostutkimuksissa on lannoitteena käytetty poikkeuksetta pölymäistä irtotuhkaa.

Kuivan irtotuhkan levityksessä on esiintynyt teknisiä ja työhygienisiä ongelmia (Hakkila ja Kalaja 1983, Hakkila 1986, 1996). Toisaalla Keski-Pohjanmaalla turkistalouden jätteistä on tullut ympäristö- ja varastointiongelma. Tuhkan ja lietteen yhdistäminen rakeiksi tarjoaisi vaihtoehdon näiden kummankin ongelmajätteen hyödyntämiseen (Ferm & Takalo 1981, Takalo 1980a,b, 1997, Veijalainen ym. 1993). Rakeistetun tuhkan käytön yhtenä ongelmana on tähän asti pidetty sen kalleutta perinteisiin lannoitusvaihtoehtoihin verrattuna.

Viime vuosina suurin kiinnostus tuhkaan ja sen rakeistukseen on ollut Ruotsissa (Palmerberg ym. 1994, Jakobsson & Ring 1995). Myös suomalaiset metsänomistajat ja tuhkan tuottajat ovat uudestaan kiinnostuneet rakeistetusta tuhkalannoitteesta ekologisten ja ympäristönsuojelullisten näkökohtien takia (mm. Kostiainen 1996). Tätä taustaa vasten käytännön metsätalous tarvitsee tietoa tuhkalannoituksen kannattavuudesta.

Tuhkalannoituksen kannattavuutta ei ole maassamme paljoa tutkittu. Tuhkalannoituksella ei ole saatu mainittavaa kasvunlisää kangasmetsissä, joissa kasveille käyttökelpoisen tyypin niukkuus rajoittaa selvimmin puuston kasvua (Mälkönen 1996). Tämän vuoksi tavanomaisilla suomalaisilla kivennäismailla tuhkalannoitus tuntuu kannattamattomalta, kun lannoituskustannusten on laskettu olevan noin 2000 mk/ha (Kostiainen 1996). Sen sijaan ojitetuilla turveilla tuhkalannoitus on puuston lisäkasvun suhteen järkevä vaihtoehto (Silfverberg ja Huikari 1985).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää Metsäntutkimuslaitoksen pitkäaikaisten kenttäkokeiden avulla puutuhkalannoituksen kannattavuutta ojitetuilla turveilla. Metsikkötason laskelmissa verrataan eri tuhkamäärien kannattavuutta pelkkään ojitusvaihtoehtoon yksityismetsänomistajan näkökulmasta. Lisäksi tarkastellaan puutuhkalannoituksen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä rakeistetun tuhkan kannattavuutta suometsien lannoitteena.

2. Aineisto ja menetelmät

Tutkimusaineisto (taulukko 1) koostui Metsäntutkimuslaitoksen pitkäaikaisista kenttäkokeista Vilppulassa ja Muhoksella (mm. Silfverberg ja Huikari 1985, Mikkela ja Takamaa 1995, Silfverberg 1996).

Vilppulan koe XII oli ojitettu vuosina 1909, 1915 ja 1923. Kokeen lopullinen sarkaleveys oli 19 m (taulukko 1). Männyhän hajakylvö tehtiin vuonna 1916. Suopursuräme tyypitetty suo tuhkalannoitettiin (0 ja 5 t/ha) vuonna 1937, jolloin alue oli erittäin hyväkasvuista, 3 – 5 metrin pituista mäntytaimikkoa. Koe oli harvennettu neljästi vuosina 1953 – 1992 (taulukko 2). Vuonna 1993 puustoa oli 92 m³/ha lannoittamattomalla kokeen osalla. Tuhkalannoitetulla kokeen osalla puustoa oli 177 m³/ha.

Taulukko 1. Tuhkalannoituskokeiden perustiedot lannoitushetkellä.

Koe	Perustamis- vuosi	Suotyyppi a)	Turvekerros m	Sarkaleveys m	Puuston ikä v	Puuston tilavuus m ³ /ha
VILPPULA XII	1937	IR	2,2	19	21	15
VILPPULA XIII	1937	TR	1,2	19	59	15
LEPPINIEMI	1947	MeKaN	0,7 – 1,5+	60	<10	4

a) Suotyyppien selitykset: IR = isovarpuräme, TR = tupasvillaräme, MeKaN = mesotrofinen kalvakkaneva.

Vilppulan koe XIII oli ojitettu vuosina 1909, 1923 ja 1935. Alunperin isovarpuinen tupasvillaräme tuhkalannoitettiin (0, 5 ja 10 t/ha) vuonna 1937, jolloin alue oli lievästi oksaista kasvuisaa, nuorta mäntymetsää (taulukko 1). Koe harvennettiin vuosina 1957, 1984 ja 1993 (taulukko 2). Vuonna 1993 puustoa oli lannoittamattomalla kokeen osalla 120 m³/ha. Tuhkamäärällä 5 t/ha puustoa oli 246 m³/ha, ja tuhkamäärällä 10 t/ha puuston tilavuus oli 213 m³/ha.

Muhoksen Leppiniemen koe ojitettiin vuonna 1933. Kokeen sarkaleveys oli 60 m (taulukko 1). Epäonnistuneen metsänviljelyn jälkeen mesotrofiselle kalvakkanevalle levitettiin vuonna 1947 koivuhalon tuhkaa. Lannoittamattoman vertailukoealan viereen annettiin tuhkaa yhdelle koealalle 8 t/ha ja toiselle koealalle 16 t/ha. Koe oli harvennettu vuosina 1975, 1983 ja 1988 (Silfverberg ja Hotanen 1989). Vuonna 1994 lannoittamattomalla vertailuruudulla puustoa oli 26 m³/ha. Tuhkamäärällä 8 t/ha puustoa oli 162 m³/ha, ja tuhkamäärällä 16 t/ha 360 m³/ha (taulukko 2).

Tuhkalannoituksen kokonaiskustannukset muodostuvat tuhka-, suunnittelu- ja työnjohtokustannuksista, lähi- ja kaukokuljetuskustannuksista sekä levityskustannuksista (ks. Keipi 1972, Palmberger ym. 1994, Takalo 1997, taulukko 3). Tuhka oletetaan saatavan ilmaiseksi metsäteollisuudesta tai lämpölaitoksilta. Kustannukset aiheutuvat tuhkan käsittelystä, kuljetuksesta ja levityksestä. Ruotsissa tuotantopaikalta metsään toimitettu, rakeistettu tuhkatonni maksoi traktorilla levitettynä noin 400 mk (Palmberger ym. 1994). Tällöin hehtaarikustannus (5 t/ha) olisi Suomen olosuhteissa noin 2000 mk/ha (Lauhanen 1996). Kostiainen (1996) on laskenut rakeistetun tuhkan (3 t/ha) hehtaarikustannukseksi Pohjois-Karjalassa noin 1000 mk. Takalon (1997) esittämän arvion mukaan tuhkan käsittelytekniikan kehittyessä ja käyttömäärien kasvaessa, rakeistus, kuljetus ja maastolevitys tulisivat maksamaan noin 200 mk/t, jolloin tuhkalannoituksen kustannukseksi (5 t/ha) muodostuisi 1000 mk/ha.

Tämän tutkimuksen kannattavuuslaskelmissa lannoituslaskiksi oletettiin yksi hehtaari. Käytännössä lannoitusalan kasvaessa työn yksikkökustannukset (mk/ha) alenevat. Töiden suunnittelu oletettiin metsänomistajalle ilmaiseksi. Työnjohtoon oletettiin jäävän metsänomistajan vastuulle, jolloin ulkopuoliselle maksettavia työnjohtokustannuksia ei aiheutunut. Käytännössä suunnittelu- ja työnjohtokustannukset ovat kuitenkin laskelmissa yhtä suuret, jolloin ne eivät aiheuta kannattavuuseroja eri vaihtoehtojen välillä.

Koska tuhkalannoitus lisää nevoilla ja turvepelloilla hieskoivun määrää, otettiin taimikonhoito vaihtoehtolaskelmiin mukaan. Taimikonhoidon oletettiin maksavan keskimäärin 892 mk/ha 7 vuotta tuhkalannoituksen jälkeen (Sevala 1996).

Jokaisen kokeen puustonmittaustiedoista saatiin lannoittamattoman ja kunkin tuhkalannoituskäsittelyn kokonaistuotokset. Kokonaistuotokseen sisällytettiin tutkimusjakson hakkuukertymät sekä puuston tilavuus laskentajakson lopussa (m³/ha) (taulukko 2). Kun kokonaistuotos jaettiin lannoituksesta kuluneella ajalla, saatiin tuhkalannoituksen ja ojituksen aiheuttama keskimääräinen vuotuinen lisäkasvu.

Hakkuukertymistä hukkapuuta oletettiin olevan 5 % (arvoltaan 0 mk/m³) (Hakkila 1992). Hakkuukertymien tukkipuusuudet saatiin kenttäkoemittauksista ja Nyyssösen taulukosta (Päivinen 1991). Vilppulan kokeen XII tuhkakäsittelyruudulla koivun osuus oli viimeisimmässä hakkuukertymässä 25 m³/ha. Kokeella XIII koivua ei ole hakattu, mutta sitä oli loppupuustossa 7 – 22 m³/ha. Muhoksen Leppiniemen koealat olivat puhtaita mäntypuustoja. Tukkipuun hinnaksi oletettiin laskelmissa 200 mk/m³ ja kuitupuun hinnaksi 100 mk/m³.

Taulukko 2. Kokeiden puustotiedot ja vuotuiset hakkuukertymät. * = hakkuuvuodet suluissa.

Tuhkaa t/ha	Tilavuus m ³ /ha	Tilavuuskasvu m ³ /ha/a	Hakkuupoistuma m ³ /ha	Tukkipuusuus m ³ /ha
Vilppula XII (mitattu 1993)				
* (1953;1957;1984;1992)				
0	92	3,2	11; 3; 57; 41	0; 0; 3; 14
5	177	7,8	44; 8; 68; 81	0; 0; 18; 30
Vilppula XIII (mitattu 1993)				
* (1957,1984,1993)				
0	120	2,2	9;14;46	0; 1; 6
5	246	3,9	20;23;73	0; 9; 38
10	213	5,1	16; 29; 119	1;11; 60
Leppiniemi (mitattu 1994)				
* (1975;1983;1988)				
0	26	1,2	1; 0; 0	0; 0; 0
8	162	6,9	90; 45; 65	0; 6; 10
16	360	10,9	90; 70; 75	0; 13; 27

Kannattavuuslaskelmissa haluttiin selvittää pitkäaikaisten kenttäkokeiden avulla, kannattaako tuhkalannoitus pelkkään ojitusvaihtoehtoon verrattuna tietyillä puutavaran hintaoletuksilla, tuhkamäärillä sekä tuhkalannoitus- ja metsänhoitokustannuksilla (taulukko 3). Kokeittaiset tuhkalannoituksen ja ojituksen kannattavuuserot määritettiin eri toimenpidevaihtoehtojen nettotuottojen nykyarvojen avulla sekä sisäisen korkokannan menetelmällä (mm. Keipi 1972, Holopainen 1976).

Nykyarvomenetelmässä verrataan tuhkalannoitushetken diskontattujen tuottojen ja kustannusten erotusta (taulukko 3). Jos tuotot ovat kustannuksia suuremmat, on investointi kannattava vaihtoehto. Eri vaihtoehtojen nykyarvoja vertaamalla voidaan tarkastella eri vaihtoehtojen välistä kannattavuutta. Sisäisen koron laskentamenetelmässä puolestaan määritetään se reaalikorkokanta, jolla vertailuajankohtaan diskontattujen tuottojen ja kustannusten summat ovat yhtä suuret (Holopainen 1976).

Tutkimuksen laskentajakso uloittui lannoitushetkestä viimeisimpään puustonmittausajankohtaan. Harvennushakkuiden tuotot ja laskentajakson lopussa olevat puuston arvot diskontattiin 1, 3 ja 5 prosentin laskentakoroilla lannoitushetken (taulukko 3, Keipi 1972, Holopainen 1976, Hämäläinen ja Laakkonen 1983, Rantala ja Moilanen 1993). Tuotoista vähennettiin lannoitushetken diskontatut tuhkalannoitus- ja taimikonhoitokustannukset. Laskelmat laadittiin ensin omin varoin tehtyinä investointeina. Laskelmissa otettiin huomioon myös metsänparannustuki (30 % ja 50 %), jota yksityismetsänomistaja voi valtiolta saada lannoitusinvestointeihin. Laskelmat tehtiin ilman arvonalisäveroa, koska arvonalisävero on metsänomistajalle yleensä vähennyskelpoinen erä.

Taulukko 3. Tuhkalannoituksen kannattavuuden laskentakehikko.

Menot	
Tuhkalannoitus, mk/t	200, 500
Taimikonhoito, mk/ha	0, 892
Metsänparannustuki, %	0, 30
Laskentakorko, %	1, 3, 5
Laskentajakso, v	47, 56
Tulot	
Hakkuukertymät ja loppupuuston hakkuuarvo (katso taulukko 2)	
Tukkipuu, mk/m^3	200
Kuitupuu, mk/m^3	100
Puutavaran hintavaihtelu, %	-20,+20

3. Tulokset

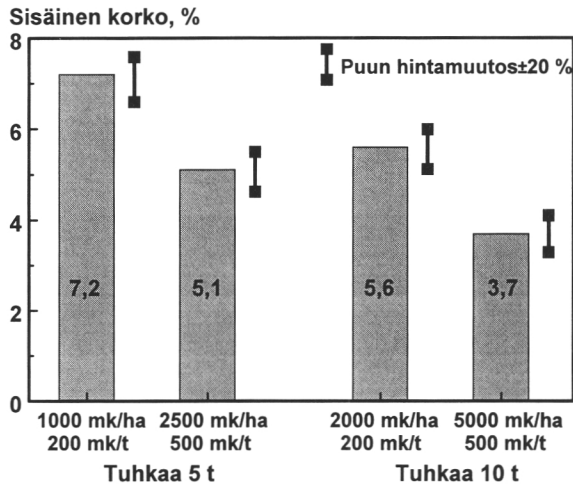
Vilppulan kokeella XII tuhkalannoituksella aikaan saatu kasvunlisä oli $3,1 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ pelkkään ojitusvaihtoehtoon verrattuna. Omarahoitteinen tuhkalannoitus oli lannoittamatonta ojitusvaihtoehtoa 2200 mk/ha kannattavampi, kun lannoituskustannus oli 1000 mk/ha (200 mk/t) ja laskentakorko 5 prosenttia (taulukko 4). Lannoituskustannuksen ollessa 2500 mk/ha (500 mk/t) kannattavuus oli 700 mk/ha tuhkalannoituksen hyväksi. Omarahoitteisen tuhkalannoituksen sisäinen korko oli 9,3 %, kun tuhkalannoitus maksoi 200 mk/t . Lannoituskustannuksen ollessa 500 mk/t sisäinen korko oli vastaavasti 5,7 % (taulukko 5).

Myös Vilppulan kokeella XIII tuhkalannoitus paransi metsikön kasvua ja kokonaistuotosta. Lannoittamattomaan vaihtoehtoon verrattuna tuhkamäärän 5 t/ha aiheuttama kasvunlisä oli $3,1 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ ja tuhkamäärän 10 t/ha kasvunlisä $3,4 \text{ m}^3/\text{ha/a}$. Vilppulan kokeen XIII tuhkalannoitus (5 t/ha) osoittautui 5 prosentin laskentakorolla 1700 mk/ha pelkkää ojitusta kannattavammaksi, kun tuhkatonnin hinta oli 200 mk. Jos tuhkatonni maksoi 500 mk, oli tuhkalannoitus enää 200 mk/ha ojitusta kannattavampi (taulukko 4).

Tuhkamäärän ollessa 10 t/ha kannattavuus oli heikompi kuin tuhkamäärällä 5 t/ha, jos laskentakorko oli 3 tai 5 prosenttia. Jos tuhkamäärä oli 10 t/ha, ja jos tuhkatonni maksoi 500 mk, ei lannoitus kannattanut pelkkään ojitukseen verrattuna 5 prosentin laskentakorolla (kuva 1). Omarahoitteisen investoinnin sisäinen korko oli 7,2 prosenttia, kun tuhkamäärä oli 5 t/ha (200 mk/t) ja 5,6 prosenttia, kun tuhkaa levitettiin 10 t/ha (200 mk/t) (taulukko 5, kuva 1). Kustannusten kasvu (300 mk/t) alensi omarahoitteisen investoinnin sisäisiä korkoja noin 2 prosenttiyksikköä kummallakin tuhkamäärällä.

Muhoksen Leppiniemen kokeella lannoittamattoman ojitusvaihtoehdon kokonaistuotos oli $27 \text{ m}^3/\text{ha}$ 47 vuodessa. Tuhkamäärä 8 t/ha tuotti kasvunlisää $7,1 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ ja tuhkamäärä 16 t/ha $12,1 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ lannoittamattomaan ojitusvaihtoehtoon verrattuna. Omarahoitteinen investointi (8 t/ha, 200 mk/t) oli 5 prosentin laskentakorolla 4500 mk/ha lannoittamatonta vaihtoehtoa kannattavampi (taulukko 4). Kun tuhkaa levitettiin 16 t/ha (200 mk/t), omarahoitteinen investointi oli 7400 mk/ha lannoittamatonta vaihtoehtoa kannattavampi. Jos tuhkatonni maksoi 200 mk, investoinnin sisäiset korot olivat tuhkamäärällä 8 t/ha $0,3 - 0,9$ prosenttiyksikköä suuremmat kuin tuhkamäärällä 16 t/ha (taulukko 5).

Vilppula XIII
Omarahoitteinen tuhkalannoitus



Kuva 1. Omarahoitteisen tuhkalannoituksen sisäiset korot (%) Vilppulan kokeella XIII eri tuhkamäärillä ja kustannuksilla. Puun hintavaihtelu on tarkastelussa mukana. Investointijakso 1937 – 1993.

Taulukko 4. Tuhkalannoituksen kannattavuus (mk/ha) eri kustannus- ja korkotasolla. Taimikonhoito (892 mk/ha) ei ole laskelmissa mukana.

Tuhkaa	Lannoituskustannus mk/ha	Metsänparannustuki					
		0 %			30 %		
t/ha	mk/ha	Laskentakorko					
		1%	3%	5%	1%	3%	5%
VILPPULA XII							
5	1000	15500	5800	2200	15800	6100	2500
5	2500	14000	4300	700	14800	5100	1500
VILPPULA XIII							
5	1000	19200	6100	1700	19500	6400	2000
5	2500	17700	4600	200	18500	5400	1000
10	2000	19600	5500	800	20200	6100	1400
10	5000	16600	2500	-2200	18100	4000	-700
LEPPINIEMI							
8	1600	26300	11200	4500	26800	11700	5000
8	4000	23900	8800	2100	25100	10000	3300
16	3200	50700	20300	7400	51600	21200	8300
16	8000	45900	15500	2600	48300	17900	5000

Taulukko 5. Tuhkalannoitusinvestoinnin sisäiset korot (%). Selitykset; a = omarahoitteinen tuhkalannoitus, b = omarahoitteinen tuhkalannoitus + metsänparannusavustus 30 %, c = omarahoitteinen tuhkalannoitus + taimikonhoito (892 mk/ha), d = omarahoitteinen tuhkalannoitus + taimikonhoito (892 mk/ha) + metsänparannusavustus 30%.

Tuhkaa t/ha	Lannoituskustannus mk/ha	Toimenpide			
		a	b	c	d
VILPPULA XII					
5	1000	9,3	11,2	7,5	9,2
5	2500	5,7	7,0	5,0	6,2
VILPPULA XIII					
5	1000	7,2	8,0	6,1	7,0
5	2500	5,1	5,9	4,6	5,4
10	2000	5,6	6,4	5,0	5,8
10	5000	3,7	4,5	3,5	4,2
LEPPINIEMI					
8	1600	8,9	10,0	8,0	9,2
8	4000	6,1	7,2	5,7	6,8
16	3200	8,1	9,1	7,7	8,7
16	8000	5,7	6,6	5,5	6,4

4. Tarkastelu

Tutkimuksessa selvitettiin puutuhkalannoituksen kannattavuutta pelkkään metsäojitukseen nähden. Laskelmat tehtiin metsikkötasolla yksityismetsänomistajan näkökulmasta. Tutkimuksessa sovellettiin pitkän aikavälin, 44 – 56 vuoden aikajakson todellisia hakkuukertymiä ja tietyllä hetkellä vallitsevan puuston tilavuutta ja hakkuuarvoa. Tuloksia tarkastellessa on huomattava, että myös koesarjan tuhkalannoitusinvestoinneista saadaan harvennustuottoja aina päätehakkuihin asti (ks. Holopainen 1976). Vilppulan kokeet XII ja XIII olivat viimeisimmällä mittaushetkellä uudistuskypsiä. Sen sijaan Muhoksen Leppiniemessä puuston kasvatus jatkuu vielä puuston iän puolesta, mutta päätehakkuuseen asti saatavan puuston tuotoksen arviointi on epävarmaa.

Tuhkalannoituksen aiheuttama puuston lisäkasvu on kaikilla kokeilla selvästi nähtävissä (Silfverberg ja Hotanen 1989, Mikkilä ja Takamaa 1995). Laskelmissa oli mukana kuitenkin vain neljä koetta, mikä rajoittaa tulosten yleistämistä. Vertailumateriaalina voidaan kuitenkin käyttää koko maan kattavaa aineistoa (Silfverberg ja Huikari 1985), jonka mukaan 5 – 6 t/ha:n tuhkalannoitus sai 40 vuodessa aikaan keskimäärin kasvunlisää 3 m³/ha/a. Tämän tutkimuksen kasvunlisät edustivat Vilppulan kokeilla XII ja XIII keskimääräistä tasoa. Sen sijaan Leppiniemen tuhkamäärät (8 ja 16 t/ha) sekä kasvunlisät ylittivät em. valtakunnalliset keskiarvot 47 vuoden aikajaksolla. Vanhat kentäkokeet on perustettu useimmiten karuille, vähäpuustoisille rämeille ja nevoille (ks. Silfverberg & Huikari 1985), kun nykyisin tuhkalannoitusta harkitaan useimmiten tehtäväksi hyväpuustoissa ojitusmetsissä tai kivennäismailla.

Aikaisemmissa tutkimuksissa Silfverbergin ja Issakaisen (1996) mukaan tuhkalannoitus (5 – 6 t/ha) tuotti lannoittamattomaan vaihtoehtoon verrattuna 40 vuodessa 9200 mk/ha enemmän tuloja eräällä Oulun lähellä sijaitsevalla lyhytkorsinevalla. Lauhasen (1996) esittämien laskelmien perusteella tuhkalannoitus kannatti 4 prosentin laskentakorolla, kun Silfverbergin ja Huikarin (1985) mittaama kasvunlisä oli 4 m³/ha/a. Tässä tutkimuksessa omarahoitteisena investointina tehty tuhkalannoitus kannatti pelkkään ojitusvaihtoehtoon verrattuna kaikilla esimerkkikohteilla, kun laskentakorko oli 3 prosenttia ja lannoituskustannus 200 – 500 mk/t. Tällöin kannattavuusero tuhkalannoituksen hyväksi oli kokeesta riippuen 2500 – 20300 mk/ha ja investoinnin sisäinen korko 3,7 – 9,3%.

Tuhkamäärän ja kustannusten kasvaessa toiminnan kannattavuus alkoi heikentyä sisäisten korkojen perusteella. Vilppulan kokeella XIII tuhkalannoituksen absoluuttinen kannattavuus (mk/ha) heikkeni 3 – 5 prosentin laskentakoroilla, kun tuhkamäärä kasvoi 5 t/ha ja tuhkatonnin hinta oli vakio. Näin ollen Silfverbergin ja Huikarin (1985) esittämien tulosten sekä tämän tutkimuksen kannattavuuslaskelmien perusteella 5 – 6 t/ha tuhkaa riittää ojitetuilla turvemailla kannattavan kasvunlisän aikaan saamiseksi Vilppulan kaltaisissa olosuhteissa.

Investointilaskelmissa metsänomistajan korko- ja aikamielityksillä, metsänparannustuella sekä kantohintojen muutoksilla on keskeinen merkitys (Holopainen 1976, Hämäläinen ja Laakkonen 1983, Rantala ja Moilanen 1993, Kangas ym. 1996). Kantohintojen muuttuessa 20 prosenttia omarahoitteisen investoinnin sisäinen korko muuttui 0,4 – 1,1 prosenttiyksikköä kohteesta riippuen. Tuhkan aiheuttaman lehti-puuston poistaminen taimikonhoitotyönä alensi lannoituksen kannattavuutta, mutta metsänparannustuki puolestaan paransi sitä. Metsänparannustuen kohotessa 30 prosentista 50 prosenttiin investoinnin sisäiset korot nousivat 0,7 – 1,9 prosenttiyksikköä, kun taimikonhoitovaihtoehto oli laskelmissa mukana.

Rakeistetun tuhkan pitkäaikaisista vaikutuksista puuston kasvuun ei ole julkaistu tuloksia, joten kuiran irtotuhkan lannoitusvaikutukset ovat tässä vaiheessa ainoa tietolähde. Rakeistettu tuhka on kannattava vaihtoehto, jos sen kasvuvaikutukset ovat samat kuin irtotuhkankin, ja jos sen kustannukset ovat tämän tutkimuksen tasolla. Rakeistetun tuhkan on kuitenkin arvioitu vaikuttavan metsissä ja soilla pitempään kuin irtotuhkan, mutta toisaalta rakeistetun tuhkan kasvureaktiotkin saattavat ilmetä hitaammin (Silfverberg 1996, Hytönen 1997).

Kirjallisuus

- Ferm, A. & Takalo, S. 1981. Tuhka ja puhdistamoliete – jätteitä vai hyödyksi metsälle. *Metsä ja Puu* 10–11: 10–12.
- Hakkila, P. 1986. Recycling of wood and bark ash. A state-of-the-art review for Programme Group C under the IEA Forest Energy Agreement. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 211. 44 s.
- (toim.) 1992. *Metsäenergia*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja. 422. 51 s.
- 1996. Kokemuksia Metsäntutkimuslaitoksen levityskokeista 1980-luvulla. Teoksessa: Finér, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.) *Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään?* Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 599. ss. 27–31.
- & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. Summary: The technique of recycling wood and bark ash. *Folia Forestalia* 552. 37 s.
- Holopainen, V. 1976. *Metsätalouden liikeoppi*. Johdatusta metsätalousyrittäjien ekonomiaan. Otava. Helsinki. 232 s.
- Hytönen, J. & Takalo, T. 1997. Tuhkapellettien kestävyys maastossa ja varastoinnissa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 660. ss. 44 – 50.
- Hämäläinen, J. & Laakkonen, O. 1983. Turvemaan varttuneiden männiköiden lannoituksen edullisuus. Summary: Profitability of fertilization in mature Scots pine stands on peatland. *Folia Forestalia* 570. 32 s.
- Jacobsson, S. & Ring, E. 1995. Askans å skogen –deponeringslösning eller markvård? *Skogforsk. Resultat* 2. 4 s.
- Kangas, J., Lauhanen, R. & Store, R. 1996. Kunnostusojitusvaihtoehtojen vesistövaikutusten asiantuntijavusteinen arviointi ja liittäminen päätösanalyysiin. Summary: Assessing the impacts of ditch network maintenance on water ecosystems on the basis of expert knowledge and integrating the assessments into decision analysis. *Suo* 47(2): 47–57.
- Keipi, K. 1972. Lannoituskustannukset ja tuottojen käsittely metsänlannoituksen kannattavuuslaskelmissa Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa. Summary: The concept of forest fertilization returns in Norway, Sweden and Finland. *Folia Forestalia* 152. 38 s.

- Kostiainen, A. 1996. Tuhkan rakeistus ja pelletointi lannoitteeksi -käytännön mahdollisuudet. Julkaisussa: Finer, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusseminaari Jyväskylässä ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 32–34.
- Lauhanen, R. 1996. Ennakkolaskelmia rakeistetun tuhkan kannattavuudesta metsälannoitteena. Julkaisussa: Finer, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusseminaari Jyväskylässä ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 38–44.
- Mikkeli, H. & Takamaa, H. (toim.) 1995. Jaakkoinsuon koeojitusalue. Retkeilyopas. Metsäntutkimuslaitos. 49 s.
- Mälkönen, E. 1996. Tuhka kangasmetsien lannoitteena. Julkaisussa: Finer, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusseminaari Jyväskylässä ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 21–26.
- Palmberger, B., Ståhl, K. & Widegren-Dafgård, K. 1994. Askåterföringssystem, tekniker och möjligheter. Sydkraft, Nutek, Vattenfall. Rapport 3. 44 s. + 6 liitettä.
- Päivinen, R. 1991. Metsän mittaus. Tapion taskukirja. Metsäkeskus Tapion julkaisuja. 21. uudistettu painos. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. ss. 316–320.
- Rantala, T. & Moilanen, M. 1993. Nuorten suomänniköiden lannoituksen kannattavuus Pohjois-Pohjanmaalla. Summary: Profitability of fertilization of young pine stands in northern Ostrobothnia. Folia Forestalia 821. 20 s.
- Sevola, Y. (toim.). 1996. Metsätalostollinen vuosikirja 1996. Yearbook of forest statistics 1996. Metsäntutkimuslaitos. SVT, maa- ja metsätalous 3. 352 s.
- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 588. 27 s. + 5 osajulkaisua.
- & Huikari, O. 1985. Tuhkalannoitus metsäojitetuilla turvemaidella. Summary: Wood-ash fertilization on drained peatlands. Folia Forestalia 633. 25 s.
- & Hotanen, J.-P. 1989. Puuntuhan 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.
- & Issakainen, J. 1996. Skogstillväxt på en askgödslad, nordfinsk kalmyr – 40-årigt perspektiv på asktillförsel i praktisk skala. Forest growth on an ash-fertilized oligotrophic fen in northern Finland. Suo 47(4):137–139.
- Takalo, S. 1980a. Tuhkan palauttamisen tekniikkaa. Metsäntutkimuslaitoksen metsäteknologian tutkimusosaston moniste. 3 s.
- 1980b. Tuhkan pelletöinnistä myönteisiä tuloksia. Metsä ja Puu 8: 25–26.
- 1997. Tuhka ja jätteet pelleteiksi lieriöpuristimella. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660. ss. 59–62.
- Veijjalainen, H., Silfverberg, K. & Hytönen, J. 1993. Metsäteollisuuden bioliete ja kivihien tuhka raudun-koivun taimien ravinnelähteenä. Abstract: Pulp biosludge and coal ash as nutrient sources for silver birch seedlings. Suo 44(3):63–73.
- Wihersaari, M. 1996. Kierrätettävät tuhkamäärät Suomessa. Julkaisussa: Finer, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusseminaari Jyväskylässä ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 599: 7–8.

Tuhka ja jätteet pelleteiksi lieriöpuristimella

Sauli Takalo

1. Johdanto

Ensimmäiset puutuhkan hyötykäyttöä selvittävät kenttäkokeet perustettiin jo yli 50 vuotta sitten. Sekä vanhoissa että uusissa kokeissa puutuhkan lannoitusominaisuudet varsinkin suometsissä on todettu hyväksi. Typpirikas puustoinen suo olisi kaatopaikkaa parempi sijoituspaikka tuhkalta.

Irtotuhkan lannoitekäyttöä vähentää sen huono käsiteltävyys. Kuiva tuhka pölyää, minkä takia levitys on riski sekä levittäjälle että koneenosille.

Metsäntutkimuslaitoksen Kannuksen tutkimusasemalla on tehty selvitys- ja tuotekehittelytyötä tuhkan puristamiseksi helposti käsiteltävään ja levitettävään pellettimuotoon. Yhteistyö tuhkan tuottajien kanssa on kiinteää. Kokeissa on rakeistettu tuhkaa ja erilaisia jäteaineita lähinnä metsälannoitekäyttöön. Lisäksi on tehty kokeiluja mm. vilja- ja heinäpohjaisista pelettien valmistuksesta mm. porotaloutta varten.

2. Puristimen rakenne ja toiminta

Pelletointilaitteen periaatepiirros on esitetty kuvassa 1. Puristimen muodostaa kaksi pyörivää sylinteriä, matriisi ja painesylinteri. Koetoimintaa varten valmistettiin kolme eri sylinterihalkaisijalla olevaa puristinta, joiden halkaisijat olivat 80, 140 ja 160 mm. Matriisien seinämävahvuudet (paksuudet) olivat 14, 16 ja 23 mm. Matriisiin porausten halkaisijat (reiät) olivat 8 ja 10 mm. Kokeita tehtiin myös 15° kartioreikämatriiseilla. Kartioporaus muodostuu siten, että esim. porauksen alkukartion pituus on n. 8 mm ja porauksen loppuosan suora pituus n. 13 mm.

Pelletoitava massaseos ohjataan pyörivien sylintereiden yläpinnalle ja siitä sylintereiden väliseen kiintaan, edelleen matriisiin poraukseen ja katkaisuterälle. Valmis pelletti putoaa matriisiin sisäkehälle, siitä seulaummulle ja edelleen kuljettimelle ja siiloon.

Massa etenee matriisiin porauksessa sykäyksittäin kierrosten tahdittamana noin 3 – 5 sekunnin ajan. Kun matriisin paksuus on 23 mm, pelletin syntymiseen kuluu massan kosteudesta riippuen 5 – 8 matriisin kierrosta. Kun massa porauksessa etenee, sen liikkeellelähtöön tarvitaan 400 – 600 N/cm² työntövoima. Matriisissa tapahtuva irroitus- pysähdysliike paalaa massan tiiviiksi. Kartioporatulla matriisilla työntövoiman tarve on suurempi kuin suoralla porauksella. Edellä kuvatun irroituskitkan suuruuteen ja pelletin tiheyteen vaikuttavat monet tekijät, kuten kartionmittasuhteet ja massan kosteus.

Erilaisissa komposteissa ja lannoissa ovat vaarana mm. *Salmonellan* sukuiset bakteerit. Ne tuhoutuvat +75 °C lämpötilassa. Laitteiston kehittäessä myös tämä näkökohta on otettu huomioon. Ketjun yhteyteen on rakennettu kaasukäyttöinen ”lieriöuuni”, mikä kehittää sisälleen yli +300 °C lämpöä. Uunin läpikäytyään pellettien lämpötilaksi on mitattu yli +100 °C:ta.

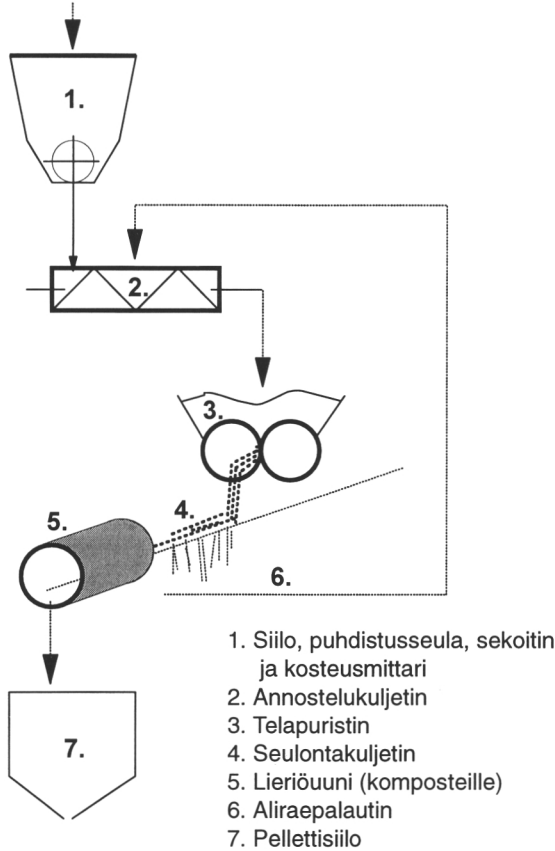
3. Tuotos ja tehontarve

Tuotostulokset on saavutettu halkaisijaltaan 160 mm matriisilla, jossa on suora 8 mm poraus, kokeissa puutuhkan kosteus oli 17 – 18 %. Voimakoneena käytettiin 10 kW diesel-traktoria. Sylintereiden kehänopeus 83 cm/s. Sama kehänopeus kattaa koko puristusalueen.

Koneen tuntituotos oli parhaimmillaan yli 2000 kg/h. Tuotosta rajoittivat moottorin pieni teho sekä matriisin pieni sisämitta (110 mm). Tämän johdosta purkausaukolla esiintyi ahtautta, kun pelletit eivät

mahtuneet suuaukolta ulos. Viimeisimmät kokeet on suoritettu 5,5 kW sähkömoottoria käyttäen. Edelläkuvatulla koneella ja massalla tuntuu tuotto oli noin 800 – 1500 kg/h.

Puristimen tuottavuus kasvaa matriisin ja moottorin koon kasvaessa siten, että 80 mm läpimittaisen matriisin tuottavuus on 170 kg/h, 140 mm 1100 kg/h ja 160 mm läpimittaisen tuotto on yli 2 tonnia kosteaa pellettiä tunnissa.



Kuva 1. Periaatepiirros pelletointilaitteesta.

4. Pelletin kuivaus

Tuhkapelleteistä on kuivaamalla poistettava kosteutta n. 8 – 10 % kovuuden lisäämiseksi. Kuivauksen jälkeen pelletin kovuus on 40 – 200 N ja se kestää rikkoontumattomana sekä varastoinnin että mekaanisen konekylvön. Kovuusmittaukset tehtiin Kahl-Pellet-Tester mittalaitteella. Pelletoitavien massojen kosteus saattaa vaihdella suuresti. Heinä ja kaura pellettoituivat hyvin kosteuden ollessa 8 %, kun se esim. tuhalla on n. 20 %.

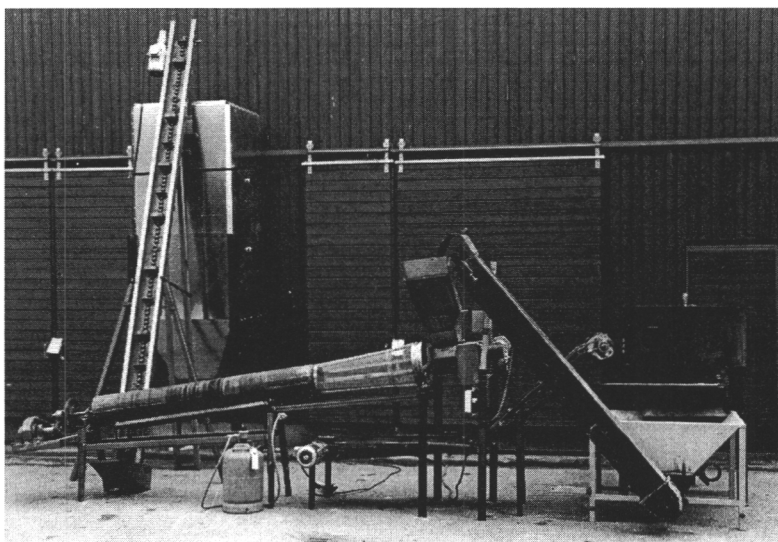
Kuivaukseen voidaan käyttää sähköä, teollisuuden hukkalämpöä, nestekaasua tai kylmäilmahuu- hallinta. Pienehköt kompostipelletoinnit voitaneen kesäaikaan myös ilmakuivata, kunhan pelletit ovat sa- teelta suojatut.

Kuivauskustannuksista ei ole tarkkoja tietoja, joten kustannusarvioissa on tukeuduttava arvioihin (Haapasaari, Kannuksen Kaukolämpö Oy). Kaukolämpölaitoksen omakustannushinnalla 10 % veden poisto pellettiton- nista maksaa n. 10 mk/t. Saman vesimäärän haihuttaminen sähkön avulla maksaa n. 40 mk/t.

Nestekaasun kustannukset lieyvät lukujen puolivälin tuntumassa. Näiden tietojen valossa kuivauskustannukset ovat kohtuulliset myös sähkökuivausta käyttäen.

5. Kustannuksista

Laitteiston hinta (kuva 2) arvioitiin lähes vastaavankaltaisella tekniikalla varustetun rehunpuristimen kilohinnan (80 mk/kg) mukaan. Puristinlinjan painoksi on arvioitu 1000 kg ja näin laskien koneen hinnaksi tulee 80 000 mk. Pelletin valmistuskustannuksista ei vielä ole varmoja laskelmia. Suuntaa antava laskelma on laadittu olettaen, että tuhka on ilmaista ja kuivaukseen käytetään voimalaitoksen tuottamaa hinnaltaan edullista lämpöä.



Kuva 2. Pelletointilaitte.

Laitteiston käyttöikää arvioitaessa selvisi, että käytössä olevien kierukkavaihteiden kestoikä on valmistajan ilmoituksen mukaan yli 20 000 h. Kustannuslaskelmissa niiden kestoiksi arvioitiin huomattavasti vähemmän eli noin 5 500 h. Pienehköt kotitarvepelletointit voidaan toteuttaa ns. "riisutulla" laitteistolla. Se käsittäisi ainoastaan puristimen ja sähkömoottorin. Hinnaltaan se olisi alle 20 000 mk.

Taustatiedot:

Palkkakustannustunnit	8 h/pv	168 h/kk	1 848 h/v
Hankintahinta	80 000 mk		
Käyttöikä	3 v		5 544 h
Jäännösarvo	0		
Huolto, korjaus ym.	á 5 mk/h		
Sähkö	5 kW/h		
Tuotos	1 150 kg/h		
Kuivaus	10 mk/t		

Kustannukset/v

Henkilökustannus (80,00 mk/h)	147 840 mk
Huolto, korjaus ym. (5 mk/h)	9 240 mk
Sähkö (50 p/kW)	4 620 mk
Kuivaus (10 mk/t)	21 240 mk
Koneen kuoletus 1v (1 848 h á 14,43 mk)	26 666 mk
Yhteensä	209 961 mk

Vuosituotos (1 150 kg/h x 1 848 h) 2 125 t/v

Kustannukset n. **99 mk/t**

6. Päätelmiä

Koneen valmistus- ja käyttökustannukset ovat tuotokseen nähden kohtuulliset. Näyttääkin siltä, että pellettejä voidaan tuottaa kilpailukykyisellä hinnalla. Lienee mahdollista, että suuremmilla lieriöillä ja automatiikkaa hyödyntämällä tuntuotoksesta kohoaa ja kustannukset alenevat. Lieriöiden pintakarkaisulla niiden käyttöikä pidentyy. Näillä rakenneratkaisuilla näyttäisi mahdolliselta rakentaa Ø n. 250 mm lieriöt, jolloin tuntuotoksesta olisi 15 kW teholla n. 3 t/h.

Lieriöperiaatteella toimiva puristin on tunnettu jo verraten kauan. Toimintavarmana ja "kaikki-ruokaisena" siitä saataneen monitoimikone erilaisten jätteiden pelleteiksi.



Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660

ISBN 951-40-1590-8

ISSN 0358-4283

Kansikuva: Esa Heino