

## **Integroitu aines- ja energiapuun korjuu turvemaalla sulan maan aikana – korjuujälki ja ravinnetalous**

Matti Sirén, Jyrki Hytönen, Jari Ala-Ilomäki, Tuomo Neuvonen,  
Tero Takalo, Erkki Salo, Hannu Aaltio ja Mika Lehtonen

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouiskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>  
ISSN 1795-150X

**Toimitus**

PL 18  
01301 Vantaa  
puh. 029 532 2111  
sähköposti [julkaisutoimitus@metla.fi](mailto:julkaisutoimitus@metla.fi)

**Julkaisija**

Metsäntutkimuslaitos  
PL 18  
01301 Vantaa  
puh. 029 532 2111  
sähköposti [info@metla.fi](mailto:info@metla.fi)  
<http://www.metla.fi/>

<b>Tekijät</b>			
Sirén, Matti, Hytönen, Jyrki, Ala-Ilomäki, Jari, Neuvonen, Tuomo, Takalo, Tero, Salo, Erkki, Aaltio, Hannu ja Lehtonen, Mika			
<b>Nimeke</b>			
Integroitu aines- ja energiapuun korjuu turvemaalla sulan maan aikana – korjuujälki ja ravinnetalous			
<b>Vuosi</b>	<b>Sivumäärä</b>	<b>ISBN</b>	<b>ISSN</b>
2013	24	978 -951-40-2410-8 (PDF)	1795-150X
<b>Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet</b>			
Etelä-Suomen alueyksikkö			
<b>Hyväksynyt</b>			
Antti Asikainen, professori, 5.2.2013			
<b>Tiivistelmä</b>			
<p>Finnish Bioeconomy Cluster FIBIC Oy (<a href="http://www.fibic.fi">www.fibic.fi</a>) EffFibre-ohjelman WP 2:n “Potential and feasibility of intensive wood and biomass production” osana Metsähallitus käynnisti 2011 yhteistyössä Metsäntutkimuslaitoksen kanssa hankekokonaisuuden ”Turvemaiden kesäkorjuu liikkeelle”, jonka tavoitteena on edistää suometsien sulanmaan aikaisten puunkorjuuoperaatioiden toteutumista. Hankekokonaisuus käsitti tutkimukset integroidun aines- ja energiapuun korjuun edellytyksistä turvemaakohteilla ja laserkeilausaineistosta saatavien tietojen käyttömahdollisuudesta turvemaaleimikoiden korjuukelpoisuuden kuvauksessa. Tässä raportissa esitetään keskeiset tulokset integroidun korjuun tutkimuksesta, jossa verrattiin korjuujälkeä ja metsään jäävää hakkuutähteen määrää viidellä eri korjuumenetelmällä, joista kolmessa energiapuuta otettiin ainespuun ohessa talteen joko kokopuuna tai rankana. Korjuu toteutettiin kesäkorjuukelpoiseksi luokitetulla turvemaakohteella sateisen kesän jälkeen lokakuussa 2011 suometsiin hyvin sopivalla kalustolla. Haastavissa kantavuusoloissa korjuu pystyttiin toteuttamaan kohtuullisella korjuujäljellä. Kun otettiin talteen pelkäästään ainespuuta ja hakkuutähteet jäivät ajourille, keskimääräinen raiteenmuodostus pysyi 100 tonnin ylimenneeseen massaansa saakka 10 cm tasossa. Ylimennyt massa sisälsi tällöin koneiden ja kuormien massat, käytännössä hakkuukoneen ylityksen ja 2–3 ajokoneen kuormaa. Tällainen kuormitus on tyypillinen keruu-urille. Varastolle tulevilla kokooaurilla kuormitus ja sen myötä raiteenmuodostus on suurempi. Rämeillä hyvän korjuujäljen vaatimuksena on, että yli 10 cm raidetta on alle 10 % urapituudesta.</p> <p>Turpeen ja juuriston kantavuusvaikutuksen yhdistävä piikkisiipikaira osoittautui lupaavaksi kantavuuden mittausvälineeksi. Sen antama leikkausmoduli samoin kuin kivisyysrassin painuma ja havu-kerroksen paksuus olivat hyviä kantavuuden ennustajia. Harvesterin raiteenmuodostus on merkittävä raiteenmuodostuksen selittäjä yhdessä mittauspisteen yli kulkeneen kokonaisuuden kanssa.</p> <p>Kaikissa tutkituissa korjuumenetelmissä metsään jäi merkittävä osuus hakkuutähteistä. Eniten hakkuutähteitä jäi ainespuun korjuussa, vähiten integroidussa korjuussa otettaessa energiapuu talteen kokopuuna. Energiapuuta talteenotettaessakin 28–48 % hakkuutähteistä jäi metsään. Turvemaiden suositellaan jätettäväksi kolmasosa hakkuutähteistä. Metsään jäävät hakkuutähteet jaettiin ositteisiin ja niiden sisältämät ravinnepitoisuudet analysoitiin. Suometsissä usein kriittisestä kaliumista jäi energiapuuta talteenotettaessakin 55–74 % kasvupaikalle. Energiapuun talteenottoa kokopuuna on kuitenkin syytä välttää kasvupaikoilla, joilla näkyy ravinnepuutoksia tai jotka ovat kaliumpuutoksen riskialueita. Jos suometsistä halutaan korjata energiapuuta, ainespuun ja rankapuun integroitu korjuu näyttää sopivalta menetelmältä niin korjuujälki- kuin ravinnepuutokset huomioon ottaen.</p> <p>Metsähallituksessa integroidun korjuun tutkimusosiota johti projektipäällikkö Jouni Karjalainen ja projektin omistaja oli hankintapäällikkö Markku Eklund. Metsäntutkimuslaitoksessa hanketta hallinnoi aluejohtaja Jori Uusitalo. Tutkimus toteutettiin Metsähallituksen Nurmeksen metsätiimin alueella Rautavaaralla. Kohteen etsimisestä ja korjuutyön toteutuksesta vastasivat suunnittelija Risto Ryynänen ja korjuuesimies Unto Korhonen Metsähallituksesta. Hakkuukone tuli Motoajo Oy:ltä, ajokone vastaavasti S. Kuittinen Oy:ltä.</p>			
<b>Asiasanat</b>			
suometsät, integroitu korjuu, korjuujälki, ravinnetalous			
<b>Julkaisun verkko-osoite</b>			
<a href="http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp256.htm">http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp256.htm</a>			
<b>Tämä julkaisu korvaa julkaisun</b>			
<b>Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla</b>			
<b>Yhteydenotot</b>			
Matti Sirén, Metla, PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti <a href="mailto:matti.siren@metla.fi">matti.siren@metla.fi</a>			
<b>Bibliografiset tiedot</b>			
<b>Muita tietoja</b>			
Taitto: Maija Heino			

## Sisällys

<b>1 Johdanto.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Tutkimusaineisto ja -menetelmät .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Tutkimustulokset.....</b>	<b>12</b>
3.1 Puuston ja poistuman rakenne .....	12
3.2 Kantavuusolot.....	12
3.3 Hakkuutyön tuottavuus.....	13
3.4 Metsäkuljetuksen tuottavuus .....	13
3.5 Raiteenmuodostus .....	14
3.6 Puustovauriot .....	17
3.7 Hakkuumenetelmien kertymävertailu .....	17
3.8 Hakkuutähteen määrä .....	17
3.9 Hakkuutähteen ravinnemäärä .....	19
<b>4 Johtopäätökset .....</b>	<b>20</b>
<b>Kirjallisuus .....</b>	<b>22</b>
<b>Liite 1. Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokitus .....</b>	<b>24</b>

## 1 Johdanto

Metsämaan soita on Suomessa 4,9 miljoonaa ha, 24 % metsämaasta. Niistä noin 4 milj. ha täyttää puuntuotantokyvyltään nykyiset metsänkasvatuskelpoisuuden edellytykset. Suometsien vuotuinen kasvu on 23 milj. m<sup>3</sup>, 23 % metsiemme kokonaiskasvusta. Puuston keskimääräinen hehtaari-kohtainen kasvu turvemaidella on siten lähes samalla tasolla kuin kivennäismailla. Runsaat puolet ojitetuista puuntuotantosoista on nuoria kasvatusmetsiä, joista noin 1 milj. ha on nyt tai lähitulevaisuudessa sopivia harvennushakkuukohteita. Saman verran tulee harvennusvaiheeseen 10–30 vuoden kuluessa.

Nykyisin soiden osuus hakkuista on 18 %, joten suopuustoja on hakattu puuston kasvuun verrattuna selvästi vähemmän kuin kivennäismaita (Ihalainen 2011). Alueellisesti suometsien osuus hakkuista voi olla selvästi suurempikin. Metsähallituksella Oulujärven eteläpuolisella alueella suometsien osuus hakkuista on noin 25 %. Merkittävä syy suometsien vähäiseen hyödyntämiseen löytyy hankalista korjuuoloista. Alhaiset hehtaarikertymät ovat ongelma niin turve- kuin kivennäismaillakin, mutta suometsissä lisäongelmia aiheuttaa maaperän heikko kantavuus sulan maan aikana. Suometsien hakkuut ovatkin pääsääntöisesti keskittyneet talvikauteen. Viime vuosina on tehty paljon tutkimus- ja kehitystyötä suometsien ympärivuotisen korjuun edistämiseksi. Tutkimusten mukaan meillä onkin nykyistä paljon suuremmat mahdollisuudet korjata puuta myös sulan maan aikaan. Edellytyksinä korjuuajan laajentamiselle ovat mm. turvemaaleimikoiden tarkempi jaottelu talvi- ja kesäkorjuukohteiksi, leimikoiden parempi ennakkosuunnittelu ja sulan maan aikaiseen korjuuseen sopiva kalusto (Högnäs 2007).

Euroopan unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään 20 % vuoden 1990 päästötasoon verrattuna ja lisäämään uusiutuvan energian osuuden 20 %:iin unionin alueella vuoteen 2020 mennessä. Suomessa ilmastopoliittisten tavoitteiden ja tehtyjen sopimusten asettamien velvoitteiden mukaisesti metsähakkeen vuotuinen käyttö pyritään nostamaan nykyisestä 6–7 miljoonasta kuutiometrillä 13,5 miljoonaan kuutiometriin vuoteen 2020 mennessä. Kiinnostus suometsien nykyisin vähän hyödynnelyihin energiapuuvaihtoihin on kasvanut, ja energiapuun talteenotto on nähty myös yhtenä keinona parantaa suometsien harvennusten kannattavuutta (Heikkilä 2007). Energiapuuta voidaan korjata joko rankana tai kokopuuna. Korjuu voidaan toteuttaa erillis-korjuuna, jolloin leimikosta korjataan vain aines- tai energiapuuta tai integroituna korjuuna, jossa otetaan talteen sekä aines- että energiapuuta. Suometsissä kokopuun korjuuta on rajoittanut huoli kasvualustan ravinteiden riittävydestä, koska latvuksen, oksien ja neulasten mukana metsiköstä poistuu huomattavasti enemmän ravinteita kuin normaalissa ainespuun korjuussa. Kokeellinen tutkimustieto energiapuun talteenoton seurannaisvaikutuksista turvemaidella onkin puutteellista.

Ravinnetasetutkimuksissa on verrattu keskenään puustoon sitoutuneita ravinnemääriä ja turpeessa puiden juuristokerroksessa olevia ravinnemääriä (mm. Moilanen ym. 1996, Kaunisto ja Paavilainen 1988, Kaunisto ja Moilanen 1998). Niiden pohjalta on päätelty, että energiapuun korjuussa metsiköstä poistuvat typpi- ja fosforimäärät ovat suhteellisen pieniä verrattuna juuristokerroksen ravinnemääriin. Sen sijaan kaliumin ja boorin kohdalla tilanne voi olla kriittinen: puuston ja pintaturpeen ravinnemäärät ovat usein samaa suuruusluokkaa. On siis mahdollista, että energiapuun korjuun seurauksena maan kalium- ja boorivarat vähenevät ja riski puiden ravinnepuutoksiin ja -epätasapainotiloihin kasvaa. Erityisesti alunperin märillä nevasyntyisillä ja paksuturpeisilla sekatyypin soilla kaliumin niukkuus (kuva 1) voi muodostua puuston kasvun kannalta minimittekijäksi, mutta tämä voi tapahtua myös ilman, että ravinteita poistuu runko- tai energiapuun mukana kasvupaikalta. Typen ja orgaanisen aineen poistuminen energiapuun mukana ei ole ensisijainen huolenaihe turvemaidella. Valtakunnalliset suositukset kestäväälle energiapuun korjuulle

nojaavat tutkitun tiedon vähyyden takia varovaisuusperiaatteeseen (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006, Koistinen ja Äijälä 2006, Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007, Kuusinen ja Ilvesniemi 2008). Uusimmissa suosituksissa (Äijälä ym. 2010) on esitetty myös suometsien kohdevalinnan kriteereitä ja suositellaan jätettäväksi korjaamatta noin 30 % latvusmassan kokonaismäärästä.

Suometsissä energiapuun talteenotto on herättänyt huolta ravinnetalouden lisäksi myös korjuujäljestä. Energiapuun korjuu kokopuuna vähentää urille saatavaa havutusta, jolla on tärkeä rooli herkkien kohteiden sulan maan aikaisessa korjuussa kantavuuden lisääjänä ja maaperävaurioiden ehkäisijänä.

Korjuujälki ja ravinnetalous määrittivät myös tämän tutkimushankkeen tutkimuskysymykset, joiksi valikoituivat korjuujälki sekä metsään jäävän hakkuutähteen määrä, rakenne ja vaikutukset metsikön ravinnetalouteen Metsähallituksen määrittelemillä korjuumenetelmillä. Myös vertailumenetelmien työajanmenekki ja kertymät olivat kiinnostuksen kohteena.



**Kuva 1.** Kaliumin puutos mänyssä näkyy neulasten kärkien keltaisuutena (Esa Heino/Metla).

## 2 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tutkimuksessa vertailtiin seuraavia korjuumenetelmiä:

1. Ainespuu yksinpuin, energiapuu kokopuuna joukkohakkuu (minimirunko aines 11 cm, energia 5 cm)
2. Ainespuu joukkohakkuu (minimirunko 7 cm)
3. Ainespuu yksinpuinhakkuu (minimirunko 7 cm)
4. Ainespuu yksinpuin, energiapuu rankana joukkohakkuu (minimirunko aines 11 cm, ranka 5 cm)
5. Ainespuu joukkohakkuu, energiapuu rankana joukkohakkuu (minimirunko aines 7 cm, ranka 5 cm).

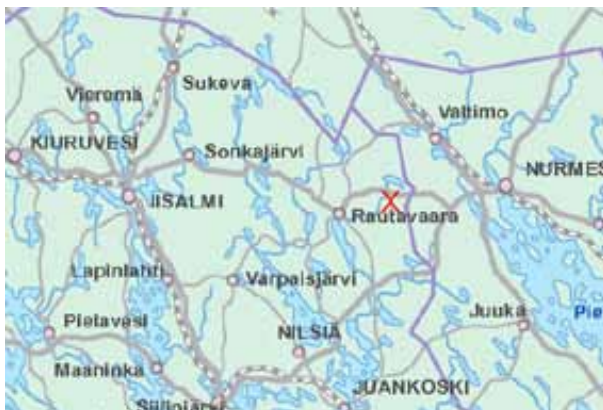
Ainespuun minimiläpimitat: mänty 6 cm, kuusi 7 cm, koivu 5 cm.

Tutkimuskohteeksi etsittiin Metsähallituksen turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokituksessa (Högnäs ym. 2011, liite 1) kesäkorjuukelpoiseksi luokiteltu kohde. Kohteeksi valittiin Rautavaaralta noin 13 km Nurmekseen päin lähtevän Taivaljärventien varrella oleva ensiharvennusleimikko, joka sijaitsee viittisen kilometriä Nurmeksen tieltä (kuva 2).

Vertailtaville menetelmille pyrittiin löytämään mahdollisimman samanlaiset olosuhteet. Menetelmät 1–3 olivat saman ajouralenkin varrella, menetelmät 4 ja 5 toisen lenkin varressa noin 250 m päässä (kuva 3).

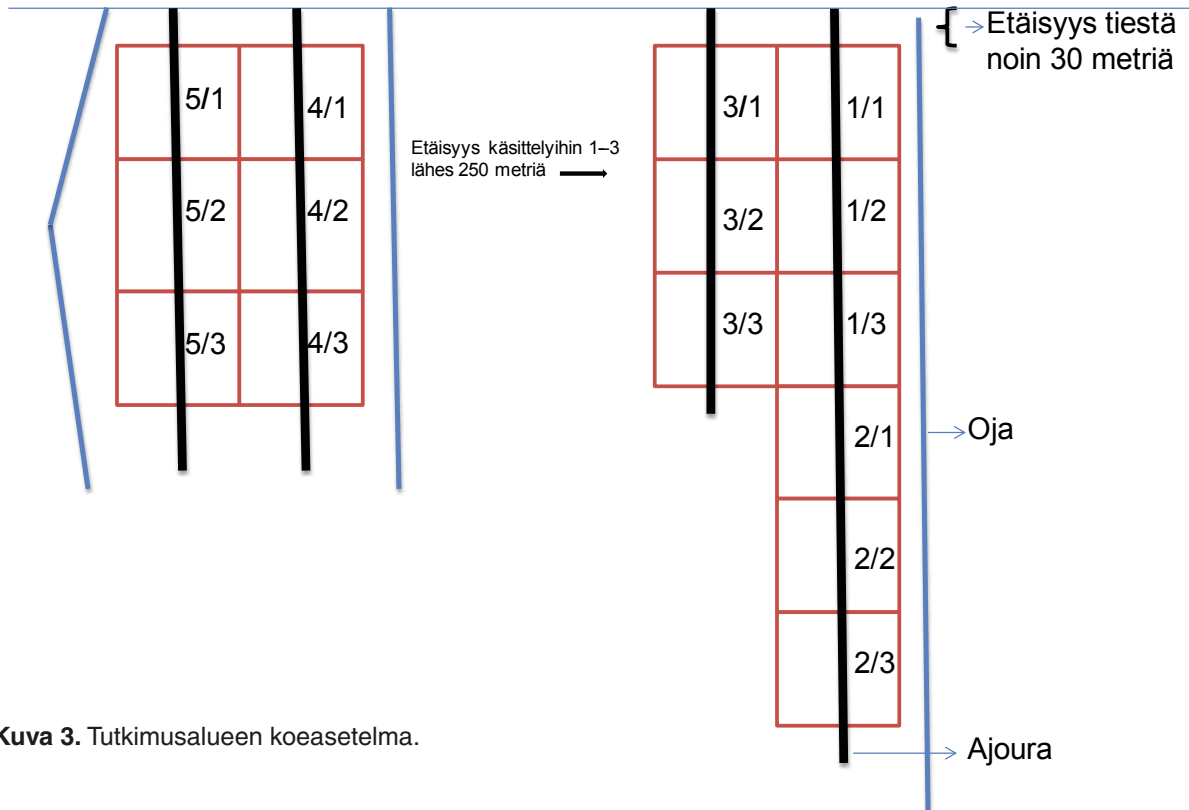
Ennen hakkuuta uralinjat merkittiin maastoon. Kullekin menetelmälle rajattiin peräkkäin kolme 50 metrin koealaa. Kunkin koealan keskelle sijoitettiin vyöhykkeisiin jaettu puustokoeala (kuva 4), jolta mitattiin puustotiedot ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Jokaisesta puusta mitattiin läpimitta, pituus ja elävän latvuksen raja. Sekä hakkuun että metsäkuljetuksen jälkeen puustokoealoilta tarkastettiin jokainen puu sekä mitattiin niihin mahdollisesti syntyneet vauriot.

Ennen hakkuuta uralinjoille sijoitettiin raiteenmuodostuksen mittauspisteet 15 m välein. Niitä mitattiin kivisyysrassin painuma (neljä mittausta kustakin mittauskohdasta) ja leikkausmoduli Jari-Ala-Ilomäen kehittämällä piikkisiipikairalla (kuva 5). Piikkisiipikairan on tutkimuksissa todettu yhdistävän hyvin maaperän ja juuriston kantavuusvaikutuksen (Ala-Ilomäki ym. 2011). Kantavuutta kuvaava suure on leikkausmoduli (G), joka saadaan jakamalla leikkausjännitys kiertokulman tangentilla. Hakkuukoneen ylityksen jälkeen kustakin mittauskohdasta mitattiin lisäksi

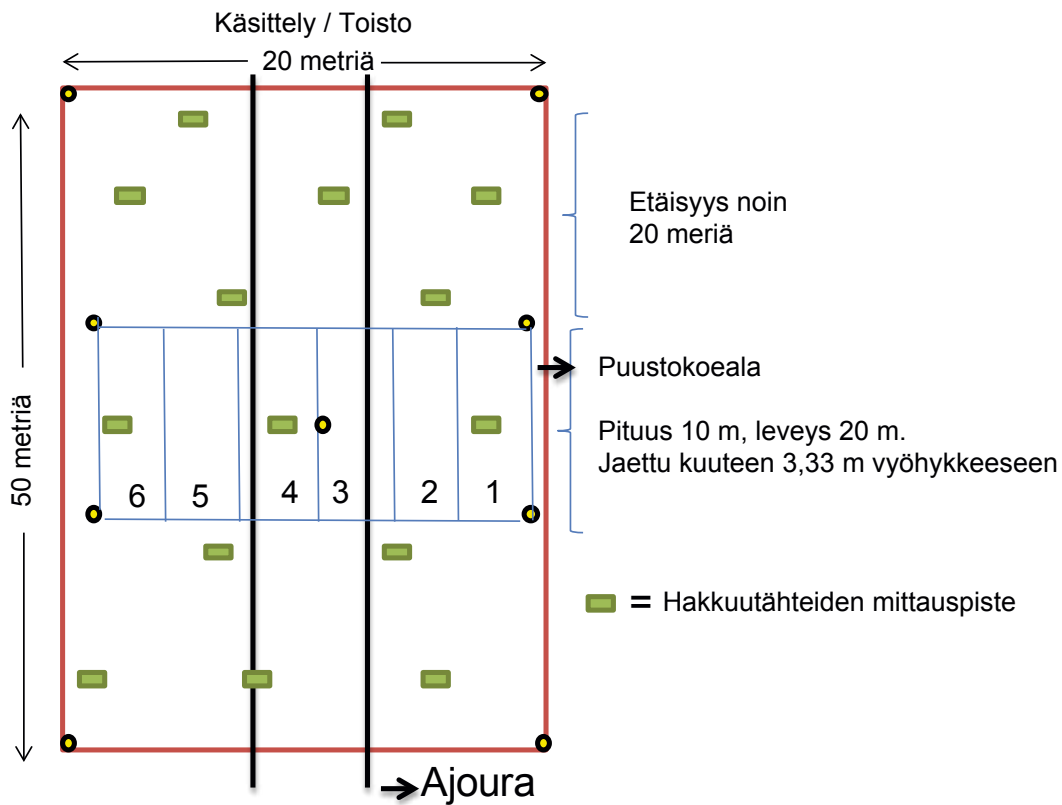


Kuva 2. Tutkimuskohteen sijainti (Maamittauslaitos 12/2012).

TAIVALJÄRVENTIE



Kuva 3. Tutkimusalueen koasetelma.



Kuva 4. Puuston ja hakkuutähteiden mittaaminen.





**Kuva 5.** Kantavuuden mittauksessa käytetty piikkisiipikaira (Jari Ala-Illomäki/Metla).

kokoonpuistuneen havukerroksen paksuus kummastakin raiteesta. Kantavuustekijöitä mittaamalla pyrittiin selvittämään ratojen vertailukelpoisuutta, mutta myös eri tekijöiden toimivuutta kantavuuden selittäjinä.

Kaikille hakatuille koealoille tehtiin hakkuutähteen mittausta käyttäen linjoittaista otantaa. Joka koealalla perustettiin ennen hakkuuta 11–18 kpl suorakaiteen muotoisia mittauspisteitä (koko 1 m x 3 m = 3 m<sup>2</sup>/kpl). Mittauskohteiden alle laitettiin kevytpeite, jonka päälle hakkuutähteet jäivät tai mittauskohta puhdistettiin mahdollisista vanhemmista hakkuutähteistä. Mittauskohtaan asetettiin puinen kehikko ja kaikki kehikon sisäpuolella olevat hakkuutähteet punnittiin maastossa vaa’alla (kuva 6). Punnituista hakkuutähteistä otettiin näytteet erikseen kosteuden määrittystä ja ravinneanalyysiä varten. Kosteusnäytteet punnittiin tuoreina maastossa. Laboratoriossa kosteusnäytteet kuivattiin 105 °C lämpötilassa kunnes niiden massa ei enää muuttunut. Näytteiden kosteusprosentti laskettiin tuorekosteuden ja kuivamassan avulla. Hakkuutähtenäytteet ositeltiin laboratoriossa kolmeen kokoluokkaan (1: neulas ja lehdet; 2: 2 mm ja sitä ohuimmat oksat sekä irralliset tuohen ja kuoren palat; 3: yli 2 mm:n oksat) (kuva 7). Koealoille jääneen hakkuutähteen kuivamassa laskettiin käyttämällä ruutukohtaisia kosteusprosentteja. Laboratoriossa analysoitiin hakkuutähteen ravinnepitoisuudet eri käsittelyissä normaaleilla Metsäntutkimuslaitoksessa käytetyillä menetelmillä (Halonen ja Tulkki 1981). Metsään jääneiden hakkuutähteen ravinnemäärät laskettiin hakkuutähteen ravinnepitoisuuksien avulla. Tilastollisessa analyysissä käytettiin varianssianalyysia, jossa kovariaattina oli koealoilta ennen hakkuuta mitattu runkoluku ja puuston tilavuus.

Korjuu tehtiin lokakuun alussa 2011. Syksyn sademäärät olivat Rautavaaralla normaalia suuremmat. Koepaikan lähellä sijaitsevassa Ilmatieteen laitoksen mittauspisteessä syyskuun 2011 sademäärä oli 94,1 mm, kun se vuosina 2000–2010 on syyskuussa ollut keskimäärin 56,7 mm (Venäläinen ym. 2005, Ilmatieteen laitoksen tilastopalvelu).

Tutkimuskohteella hakkuukoneena oli Ponsse Fox, jossa takana oli superkantavat telat, edessä ketjut etutelin takapyörissä. Ajokoneena oli Valmet 838, jossa oli superkantavat telat edessä ja takana. Laskelmissa hakkuukoneen massana on käytetty 20 000 kg ja ajokoneen massana ilman



**Kuva 6.** Hakkuutähteen mittausta maastossa (Tero Takalo/Metla).



**Kuva 7.** Eri kokoluokkiin jaoteltuja hakkuutähteitä (Esa Heino/Metla).

kuormaa 14 200 kg. Molempien koneiden kuljettajat olivat kokeneita ja taitavia. Hakkuukoneen kuljettaja oli kuitenkin ajanut uutta Foxia vasta parisataa tuntia.

Kokenut työntutkija keräsi hakkuu- ja metsäkuljetusaineiston maastotietokoneelle laaditulle ohjelmalle. Hakkuussa aikatutkija arvioi poistettavien puiden läpimitat, jotka oli tarkoitus täsmäyttää hakkuukoneen Stm-tietojen kanssa. Väärästä tallennusmoodista johtuen Stm-tietoihin ei kuitenkaan saatu runkokohtaista aikaleimaa, ja tämän vuoksi hakkuun runkohtaiset ajanmenekit perustuvat aikatutkijan läpimitta-arvioon. Metsäkuljetuksessa kuormakoko määritettiin purkuvaiheessa kuormainvaa'alla.

Hakkuussa ja metsäkuljetuksessa mittauspisteissä mitattiin jokaisen ylityskerran jälkeen raiteen syvyys ja leveys sekä kirjattiin ylös kuorman täyttöaste. Täyttöasteen, kuorman massan ja koneen omamassan avulla laskettiin mittauspisteen ylimennyt massa kunkin ylityksen jälkeen.

Osa vertailtavista menetelmistä oli kuljettajalle uusia. Nopea vaihtaminen menetelmästä toiseen hyvin vähäisellä harjoittelulla oli kuljettajalle haasteellista. Tämän vuoksi toteutuneet kertymät (ainespuu vs. energiapuu) eivät välttämättä vastaa sitä, mitä ne olisivat, jos toimittaisiin täysin menetelmä- ja katkantaohjeistuksen mukaan. Kertymävertailuja vaikeuttaa myös olosuhteiden vaihtelu menetelmien välillä. Kertymiä verrattiin korjuussa toteutuneen lisäksi myös laskennallisesti leimikkotasolla Motti-simulaattorilla (Hynynen ym. 2005). Vertailun perustana olivat kaikkien mitattujen puustokoealojen mitatut poistumat.

Myös metsään jäävän hakkuutähteen määrää eri menetelmillä vertailtiin otantamittauksen lisäksi laskennallisesti Motti-simulaattorilla. Tällöin kunkin hakkuumenetelmän puustokoealojen poistumat jaettiin tukkipuuhun, kuitupuuhun, runkohukkapuuhun, eläviin ja kuolleisiin oksiin sekä neulasiin. Metsään jäävän ja talteenotetun hakkuutähteen määrä määritettiin menetelmittäisten hakkuuohjeiden perusteella.

### 3 Tutkimustulokset

#### 3.1 Puuston ja poistuman rakenne

Lähtöpuusto, jäävä puusto ja poistuma esitetään taulukossa 1. Mukana ovat rinnankorkeudeltaan yli 4 cm puut. Hehtaari-poistumat ja poistettujen runkojen keskikoot on ilmoitettu runkopuun tilavuuksina.

Poistuman runkoluvusta mäntyä oli 51,2 %, kuusta 33,8 % ja lehtipuuta 15,0 %. Poistuman tilavuudesta mäntyä oli 70,6 %, kuusta 24,6 % ja lehtipuuta 4,8 %.

**Taulukko 1.** Kohteen puusto ja poistuma.

	Menetelmä					
	1	2	3	4	5	k-a
Tilavuus ennen hakkuuta, m <sup>3</sup> /ha	143,1	126,1	124,3	131,5	126,8	130,4
Runkoluku ennen hakkuuta, kpl/ha	1717	1433	1517	1533	1700	1580
Tilavuus hakkuun jälkeen, m <sup>3</sup> /ha	79,6	70,4	76,8	66,2	58,9	70,4
Runkoluku hakkuun jälkeen, kpl/ha	650	533	633	600	550	593
Poistuma, m <sup>3</sup> /ha	63,6	55,7	47,5	65,3	67,9	60,0
Poistettujen runkojen keskikoko, dm <sup>3</sup>	59,6	61,8	53,8	70,0	59,0	60,8

#### 3.2 Kantavuusolot

Maaperän kantavuus (leikkausmoduli, kivisyysrassin painuma sekä havukerroksen paksuus hakukoneen raiteessa) esitetään taulukossa 2.

Suurempi leikkausmodulin ja pienempi kivisyysrassin painuman arvo indikoivat parempaa kantavuutta. Menetelmällä 1 molemmat arvot osoittavat keskimääräistä parempaa kantavuutta. Menetelmillä 2 ja 3 kantavuus on ollut keskimääräistä huonompi.

Havutuksen on useissa tutkimuksissa todettu parantavan kantavuutta. Painuneen havukerroksen keskimääräinen paksuus oli pienin menetelmässä 1, jossa havutus oli hyvin vähäistä. Havukerroksen paksuus oli suurimmillaankin keskimäärin alle 10 cm.

**Taulukko 2.** Tutkimuskohteen kantavuusolot.

Menetelmä	Leikkausmoduli, kPa	Kivisyysrassin painuma, cm	Havutuksen paksuus, cm
1	60,36	44,55	1,20
2	23,38	54,08	8,55
3	36,14	57,50	7,45
4	46,77	56,13	5,25
5	42,86	38,58	3,90
K-a	41,90	50,17	5,27

### 3.3 Hakkuutyön tuottavuus

Hakkuutyön tehotuntuottavuus ( $\text{m}^3/\text{E}_0$ ) runkopuuna menetelmittäin oli seuraava:

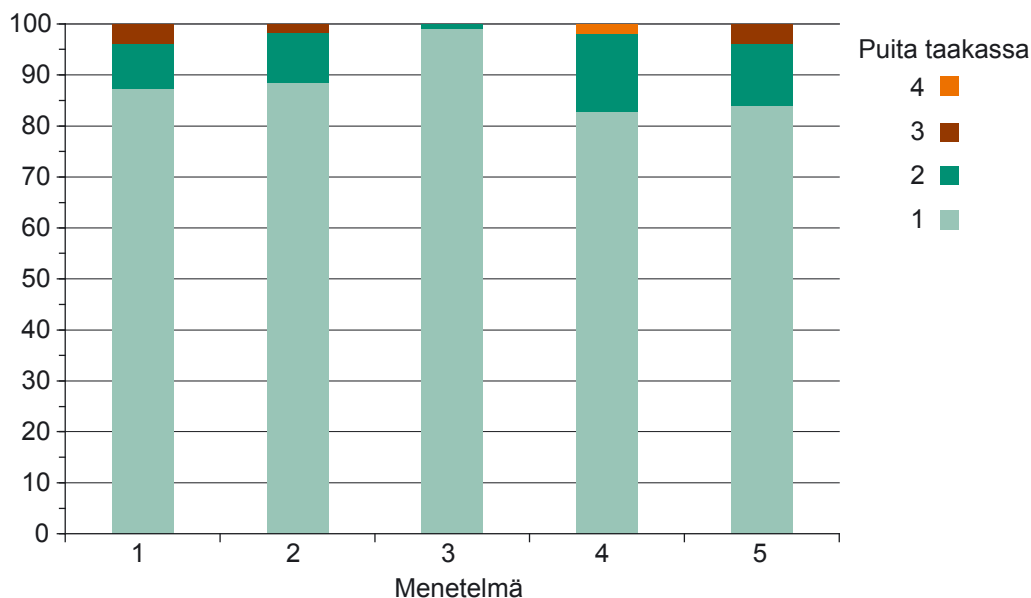
	Menetelmä				
	1	2	3	4	5
Rungon keskikoko, $\text{dm}^3$	59,7	70,0	58,6	56,6	54,9
Tuottavuus, $\text{m}^3/\text{E}_0$	10,3	11,6	11,5	10,0	11,5

Kuljettaja hyödynsi joukkokäsittelyä hyvin vähän (kuva 8). Joukkokäsittelyjen puiden osuus oli parhaimmillaankin alle viidennes (menetelmä 4). Joukkokäsittelytaakoissa oli pääsääntöisesti kaksi puuta. Kun joukkokäsittelyä käytettiin, se alensi runkokohtaista ajanmenekkiä noin 20 %. Tulos on samankaltainen aiempien tutkimustulosten kanssa.

Poistettavien puiden määrän (keskimäärin lähes 1000 runkoa/ha) olisi pitänyt mahdollistaa selvästi suurempi joukkokäsittelyjen puiden osuus. Teknisesti kone toimi joukkokäsittelyssä hyvin. Osa tutkittavista menetelmistä oli kuitenkin kuljettajalle uusia. Vieraat menetelmät, poistuman jakautuminen kolmen puulajin kesken ja kuusialikasvos johtivat joukkokäsittelyn vähäiseen hyödyntämiseen.

### 3.4 Metsäkuljetuksen tuottavuus

Metsäkuljetuksen olosuhteita ja tuottavuutta kuvaa taulukko 3. Hakkuumenetelmän 2 osalta metsäkuljetuksesta ei saatu tuloksia maastotietokoneen häiriön vuoksi. Keskimääräinen metsäkuljetusmatka oli menetelmillä 1, 3, 4 ja 5 noin 120 m.



**Kuva 8.** Taakkojen jakautuminen yksinpuin ja joukkokäsittelyn välillä sekä puiden lukumäärä joukkokäsittelytaakoissa.

**Taulukko 3.** Metsäkuljetuksen olosuhteet ja tuottavuus.

Menetelmä	Kertymä, tonnia/100 m	Kasan keski- koko, kg	Tuottavuus, tonnia/E <sub>0</sub>	Kuormausajon tuottavuus, tonnia/E <sub>0</sub>	Purkaminen, tonnia/E <sub>0</sub>
1/ainespuu	9,520	137	20,01	32,7	103,1
1/energia	3,864	101	9,8	14,02	82,5
3/ainespuu*	10,773	123	14,6	20,2	77,9
4/ainespuu	6,972	172	17,8	25,3	113,3
4/energia	3,359	81	10,3	12,8	126,0
5/ainespuu	7,860	149	15,7	23,5	100,5
5/energia	2,335	66	8,6	10,9	87,6

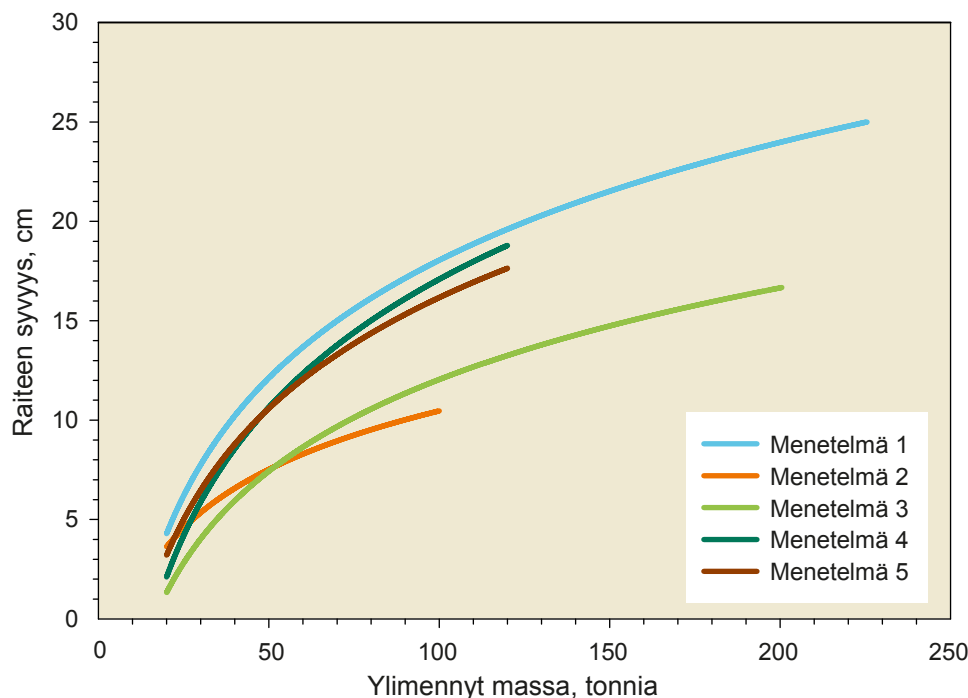
\*Kuormausajossa puita jouduttiin siirtämään huonon kantavuuskohdan yli

### 3.5 Raiteenmuodostus

Kuvassa 9 esitetään keskimääräinen toteutunut raiteenmuodostus ylimenneen massan (koneiden massat + kuormien massat) suhteen.

Mittauspisteen ylimennyt massa, leikkausmoduli, kivisyysrassin painuma ja havukerroksen pakkaus olivat kaikki tilastollisesti merkitseviä raiteen syvyyden selittäjiä. Raiteen syvyys erosi tilastollisesti merkittävästi kaikilla muilla menetelmillä regressiomallin perustasoksi asetetusta menetelmästä 3 (taulukko 4).

Raiteenmuodostusta ajatellen menetelmillä on kaksi eroavaisuutta. Keskeinen ero on vähäisempi havutus menetelmissä, joissa energiapuuta otetaan talteen (menetelmät 1, 4 ja 5). Toisaalta energiapuun talteenotto johtaa suurempiin kertymiin ja sitä kautta suurempaan ajokertojen määrään. Koko aineistosta laadittiin myös malli, jossa selittäjinä olivat ylimennyt massa, havutuksen pakkaus, leikkausmoduli ja kivisyysrassin painuma (taulukko 5).



**Kuva 9.** Keskimääräinen raiteen syvyys ylimenneen massan suhteen.

**Taulukko 4.** Raiteen syvyyttä kuvaavan regressiomallin (yhtälö 1) muuttujien kertoimet ja tilastolliset tunnuksat.

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo
a	- 0,964	0,845	-1,140	0,254
b <sub>1</sub>	0,0001137	0,000	28,216	0,000
b <sub>2</sub>	- 0,0299	0,007	-3,998	0,000
b <sub>3</sub>	0,0638	0,008	7,639	0,000
b <sub>4</sub>	-0,2461	0,040	-6,145	0,000
b <sub>5</sub>	5,111	0,555	9,208	0,000
b <sub>6</sub>	1,806	0,664	2,719	0,007
b <sub>7</sub>	4,013	0,589	6,811	0,000
b <sub>8</sub>	4,758	0,591	8,040	0,000

R<sup>2</sup> = 0,782

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_8x_8 \quad (1)$$

missä

y = raiteen syvyys, cm

a = vakio

x<sub>1</sub> = ylimennyt massa, kgx<sub>2</sub> = leikkausmoduli, kPax<sub>3</sub> = kivisyysrassin painuma, cmx<sub>4</sub> = havutuksen paksuus, cmx<sub>5</sub> = valemuuttuja = 1, jos menetelmä = 1, muulloin 0x<sub>6</sub> = valemuuttuja = 1, jos menetelmä = 2, muulloin 0x<sub>7</sub> = valemuuttuja = 1, jos menetelmä = 4, muulloin 0x<sub>8</sub> = valemuuttuja = 1, jos menetelmä = 5, muulloin 0b<sub>1</sub>... b<sub>8</sub> = muuttujien kertoimet**Taulukko 5.** Raiteen syvyyttä kuvaavan regressiomallin (yhtälö 2) muuttujien kertoimet ja tilastolliset tunnuksat.

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo
a	2,706	0,798	3,393	0,000
b <sub>1</sub>	0,00011	0,000	26,773	0,000
b <sub>2</sub>	-0,0139	0,008	-1,739	0,082
b <sub>3</sub>	0,0580	0,009	6,304	0,000
b <sub>4</sub>	-0,391	0,041	-9,419	0,000

R<sup>2</sup> = 0,716

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 \quad (2)$$

missä

y = raiteen syvyys, cm

a = vakio

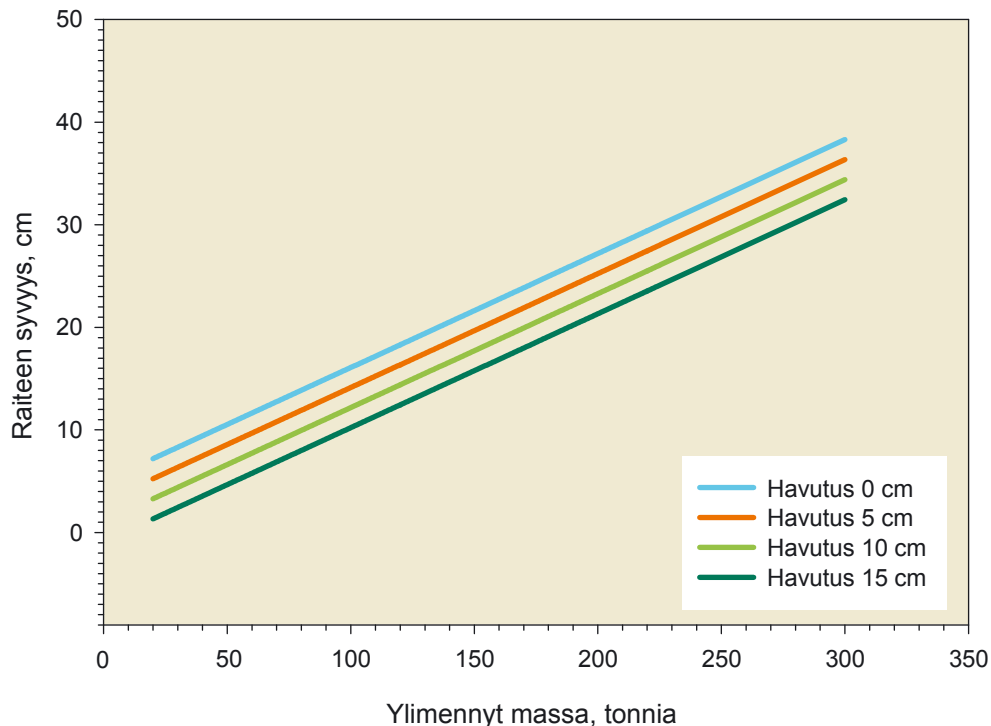
x<sub>1</sub> = ylimennyt massa, kgx<sub>2</sub> = leikkausmoduli, kPax<sub>3</sub> = kivisyysrassin painuma, cmx<sub>4</sub> = havutuksen paksuus, cmb<sub>1</sub>...b<sub>4</sub> = muuttujien kertoimet

Kuva 10 esittää taulukon 5 mallilla ennustettua havutuksen vaikutusta raiteenmuodostuksen tutkimuskohteen keskimääräisissä kantavuusoloissa (leikkausmoduli 45 kPa, kivisyysrassin painuma 50 cm).

Kohteella keskimääräinen havutuksen paksuus oli suurimmillaan 8,6 cm (menetelmä 2) ja pienimmillään 1,2 cm (menetelmä 1). Jos verrataan tilannetta, jossa havukerros on 10 cm kohtaan, jossa havuja ei ole, ero raiteen syvyydessä on vajaat 5 cm. Havutus pitää raiteenmuodostuksen kohtuullisena urilla, joissa ajetaan suometsille tyypilliset 2–3 kuormaa. Sen sijaan kokoojaurilla, joissa ajokertojen määrä on suuri, tarvittaisiin selkeästi vahvempi havutus, jotta pysyttäisiin alle 10 cm raiteen syvyydessä.

Rinnakkaisen EffFibren työpaketin 3 yhtenä osana tutkitaan kuljettajaa opastavia järjestelmiä (Väätäinen ym. 2012). Harvesterin keräämää tietoa voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti hyödyntää metsäkuljetuksen ajojärjestyksen ohjeistuksessa, maaperän kantavuuden määrittelyssä ja huonosti kantavien maastokohtien paikantamisessa. Aineistosta selvitettiin tämän vuoksi myös sitä, miten harvesterin raiteenmuodostus selittää metsätraktorin raiteenmuodostusta yhdessä mitauspisteen ylimenneen massa kanssa (taulukko 6).

Harvesterin raiteen syvyyden perusteella voidaan ennustaa, millainen kuormitus on mahdollinen, jotta raiteen syvyys ei ylittäisi asetettua raja-arvoa metsäkuljetuksessa. Korjuujälkisuosituksissa hyväksyttävä syvän raiteen (yli 10 cm) osuus on kivennäismailla ja korvissa 4 %, rämeillä 10 % urien kokonaispituudesta (Hyvän metsänhoidon suositukset 2006, Suunnittelijan opas turvemaa-metsän kunnostukseen 2012). Tutkimuskohteella raiteen syvyys harvesterin jälkeen oli keskimäärin 4,5 cm. Tällöin 10 cm raiteen syvyys saavutetaan noin 60 tonnin kokonaismassalla (koneiden + kuormien massat). Kun harvesterin raiteen syvyys on 2 cm, 10 cm raiteen syvyys saavutetaan noin 90 tonnin kokonaismassalla.



**Kuva 10.** Havutuksen vaikutus raiteenmuodostukseen.



**Taulukko 6.** Raiteen syvyyttä kuvaavan regressiomallin (yhtälö 3) muuttujien kertoimet ja tilastolliset tunnuksot.

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	p-arvo
a	-1,176	0,489	-2,405	0,017
b <sub>1</sub>	0,000105	0,000	25,765	0,000
b <sub>2</sub>	1,013	0,060	16,966	0,000
R <sup>2</sup> = 0,770				

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (3)$$

missä

y = raiteen syvyys, cm

a = vakio

x<sub>1</sub> = ylimennyt massa, kg

x<sub>2</sub> = raiteen syvyys harvesterin jälkeen, cm

b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> = muuttujien kertoimet

### 3.6 Puustovauriot

Vaurioituneiden puiden osuudet (% jäävän puuston runkoluvusta) menetelmittäin olivat seuraavat:

	Menetelmä				
	1	3	3	4	5
Runkovaurioita, %	5,9	0,0	0,0	2,8	6,1
Juurivaurioita, %	0,0	6,3	7,7	2,8	6,1
Yhteensä, %	5,9	6,3	7,7	5,6	12,2

Kaikki todetut runkovauriot olivat pintavaurioita. Runkovaurioista 80 % syntyi hakkuuvaiheessa. Runkovauriot keskittyivät urien läheisyyteen. Juurivauriot olivat pääosin katkenneita juuria alle metrin etäisyydellä juurenniskasta.

### 3.7 Hakkuumenetelmien kertymävertailu

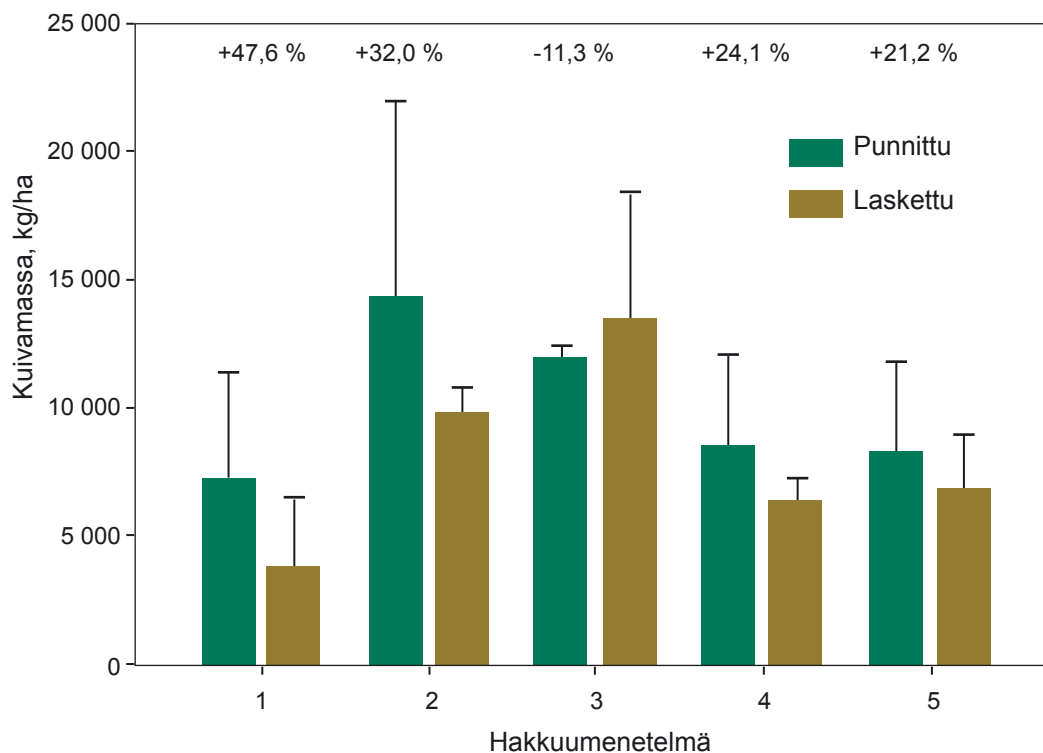
Taulukossa 7 esitetään Motti-simulaattorilla lasketut hehtaarikertymät vertailtavilla korjuumenetelmillä. Vertailun pohjana ovat kaikkien mitattujen puustokoealojen poistumatiedot. Tulos kuvaa tilannetta, jossa koko leimikko olisi hakattu vertailtavilla menetelmillä annettujen katkontaohjeiden mukaisesti.

### 3.8 Hakkuutähteen määrä

Hakkuutähteitä jäi koealoille vähiten menetelmässä 1, jossa korjattiin ainespuu ja latvus neulasineen (kuva 11). Tällöinkin hakkuutähteitä jäi keskimäärin 7,3 t/ha kuiva-aineena. Ainespuuhakkuussa, jossa korjattiin ainespuu joko joukkohakkuuna (menetelmä 2) tai yksinpuin hakkuuna (menetelmä 3) hakkuutähteitä jäi eniten (14,3 ja 12,1 t/ha). Yksinpuin hakkuussa hakkuutähteitä jäi hieman vähemmän kuin joukkohakkuussa. Tämä voisi johtua siitä, että joukkohakkuussa oksia

**Taulukko 7.** Motti-simulaattorilla laskettu leimikkotason kertymävertailu.

Menetelmä 1				
	Tukki	Kuitu	Energia	Yhteensä
Tuoremassa, kg/ha	2562,5	38171,6	17893,1	58627,2
Tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	2,9	43,0	19,3	66,2
Menetelmät 2 ja 3				
	Tukki	Kuitu	Energia	Yhteensä
Tuoremassa, kg/ha	2572,1	45165,5	0,0	47737,6
Tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	2,9	50,6	0,0	53,5
Menetelmä 4				
	Tukki	Kuitu	Energia	Yhteensä
Tuoremassa, kg/ha	2562,5	38171,6	12173,0	52907,2
Tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	2,9	43,0	13,2	59,1
Menetelmä 5				
	Tukki	Kuitu	Energia	Yhteensä
Tuoremassa, kg/ha	2572,3	45169,5	5164,8	52906,6
Tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	2,9	50,6	5,6	59,1

**Kuva 11.** Hakkutähteen kuivamassat ja niiden keskihajonnat eri hakkuumenetelmissä. Vihreät pylväät osoittavat maastossa punnitun hakkutähteen määrän ja ruskeat pylväät laskennallisen hakkutähteen määrän. Prosentit pylväiden päällä osoittavat eron laskennallisen ja maastossa punnitun hakkutähteen määrän välillä.

katkeilee enemmän kuin yksinpuin hakkuussa. Menetelmissä, joissa korjattiin ainespuu ja energiapuuta rankana, hakkuutähteitä jäi 8,4–8,6 t/ha. Menetelmien välinen ero hakkuutähteen määrästä oli tilastollisesti merkitsevä ( $F=5,262$ ,  $p=0,0036$ ). Energiapuuta kokopuuna korjattaessa hakkuutähteitä jäi 52–72 % vähemmän kuin pelkästään ainespuuta korjattaessa.

Maastossa punnittuja hakkuutähdemääriä verrattiin mitatun poistuman perusteella Motti-simulaattorilla laskettuihin hakkuutähdemääriin (kuva 7). Yhtä tapausta lukuun ottamatta laskennallinen määrä oli pienempi kuin maastossa punnittu. Punnettua hakkuutähdemäärä oli keskimäärin 21–47 % suurempi kuin laskennallinen. Laskennallisen menetelmä saattaa siis aliarvioida hakkuutähteen määrää ja siten myös maastoon jäävien ravinteiden määrää.

Hakkuutähteen punnituksessa kirjattiin massan lisäksi myös tieto siitä, sijaitseeko mittauspiste (leveys 1 m, pituus 3 m) joko kokonaan tai osittain ajouralla. Hakkuutähteistä kaikissa käsittelyssä valtaosa (72 %) oli ajourilla tai niiden välittömässä läheisyydessä. Hakkuutähteet olivat siten jakautuneet hyvin epätasaisesti. Menetelmissä, joissa korjattiin ainoastaan ainespuuta (menetelmät 2 ja 3) ajouralla oli eniten hakkuutähteitä (kuivamassa 2,8–3,8 kg/m<sup>2</sup> ajouralla). Jos hakkuun yhteydessä korjattiin myös energiapuuta, ajourille kertyi huomattavasti vähemmän hakkuutähteitä (1,5–1,8 kg/m<sup>2</sup> ajouralla). Menetelmässä 1 ajouralla oli vähiten hakkuutähteitä (1,5 kg/m<sup>2</sup> ajouralla).

### 3.9 Hakkuutähteen ravinnemäärä

Hakkuutähteissä jäi käsittelystä riippuen koelohjalle typpeä 39–67 kg/ha ja fosforia 40–11 kg/ha. Kaliumia jäi hakkuutähteissä koelohjalle 13–31 kg/ha (taulukko 8). Hakkuutähteen kaliumista jäi siten energiapuun korjuun jälkeen 55–74 % kasvupaikalle. Kaikissa hakkuumenetelmissä jäi verraten runsaasti hakkuutähteitä ja siten myös ravinteita. Huomattava osuus hakkuutähteistä oli neulasia, joiden ravinnepitoisuus on selvästi korkeampi kuin puulla ja kuorella.

**Taulukko 8.** Hakkuutähteissä koelohjalle jääneet ravinteet, kg/ha.

Menetelmä	N	P	K	Ca	Mg	B
1	39,1	4,5	13,4	27,7	4,2	0,007
2	67,1	10,8	30,7	53,3	7,6	0,010
3	64,5	7,9	24,1	42,9	6,4	0,010
4	38,4	4,4	13,6	25,0	4,1	0,003
5	41,2	5,1	17,8	28,3	4,7	0,007

## 4 Johtopäätökset

Korjuututkimus tehtiin lokakuun alussa sateisen syyskuun jälkeen. Kohde oli Metsähallituksen järjestelmissä luokiteltu kesäkorjuukohteeksi Högnäsin ym. (2011) luokitukseen perustuen. Kohdeella lähtöpuuston tilavuus oli noin 130 m<sup>3</sup>/ha, joka täyttää kesäkorjuun vaatimukset silloin, kun ajouraverkoston kuormitus on pieni tai kohtalainen. Kohteen metsäkuljetusmatka ja kivennäismaan läheisyys puolsivatkin kohdetta kesäkorjuuseen. Korjuuluokituksessa ovat mukana myös turpeen paksuus ja pohjaveden syvyys. Turpeen paksuus (alle 75 cm) paransi kantavuusluokitusta yhdellä luokalla, jonka kuitenkin paikoin lähes pinnalla oleva pohjavesi kumosi. Myöhäisyksy 2011 ei kuitenkaan olisi ollut käytännön toiminnassa kohteen korjuuaika poikkeuksellisen kosteiden sääolojen vuoksi.

Vertailtaville menetelmille pyrittiin saamaan mahdollisimman samanlaiset olosuhteet niin puuston kuin kantavuudenkin osalta, mutta tässä ei täysin onnistuttu. Menetelmällä 3 (ainespuun yksinpuin hakkuu) harvennuskertymä ja runkokoko olivat pienemmät kuin muissa menetelmissä. Maaperän kantavuus oli mittausten mukaan paras menetelmällä 1, kun taas menetelmillä 2 ja 3 kantavuus oli huonompi.

Korjuu tehtiin suometsiin hyvin sopivalla kalustolla. Hakkuuvaiheen raiteenmuodostus olisi saatanut olla vielä hieman pienempi, jos 8-pyöräisessä hakkuukoneessa olisi ollut telat myös edessä. Nyt edessä oli yksi pari ketjuja. Koneiden kuljettajat olivat molemmat kokeneita ja taitavia, mutta hakkuukone oli kuljettajalle lähes uusi. Vertailtavat menetelmät olivat hakkuukoneen kuljettajalle osin vieraita ja mahdollisuus menetelmien harjoitteluun vähäinen.

Työn tuottavuuden osalta tuloksia voidaan pitää ainoastaan suuntaa-antavina. Hakkuun tuottavuus vaihteli verraten vähän ollen alhaisin menetelmissä 4 ja 1. Joukkokäsittelyn vaikutus tuottavuuteen oli vähäinen alhaisen joukkokäsittelyprosentin takia. Parhaimmillaankin vain vajaa viidennes puista joukkokäsiteltiin, kun esimerkiksi Kärhän ym. (2011) tutkimuksessa, jossa poistuman määrä ja rungon keskikoko olivat samaa luokkaa kuin tässä tutkimuksessa, joukkokäsittelyprosentti oli koealoittain 64–83 %. Niillä rungoilla, joilla joukkokäsittelyä nyt tehdyssä tutkimuksessa tehtiin, joukkokäsittely pienensi runkokohtaista ajanmenekkiä viidenneksen. Tämä tulos on samankaltainen aiempien tutkimustulosten kanssa.

Myös metsäkuljetuksen osalta tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Menetelmien väliset tuottavuuserot ainespuun osalta johtunevat enemmänkin olosuhteiden vaihteluista kuin menetelmien eroista. Vertailua vaikeutti myös kantavuudeltaan huono urakohta menetelmällä 3, jossa puita jouduttiin jossakin määrin siirtämään huonon kohdan yli. Metsäkuljetuksen olosuhteita voidaan hahmottaa myös leimikkotason poistumavertailujen kautta.

Sulan maan aikaisen korjuun mahdollisuuksista, korjuujäljestä, kantavuutta selittävästä tekijöistä ja niiden mittaamisesta saatiin uutta tietoa. Erittäin haastavissa kantavuusoloissa korjuu pystyttiin toteuttamaan kohtuullisella korjuujäljellä. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion suosituksissa hyvän korjuujäljen rajana urapainumien osalta on, ettei yli 10 cm urapainuman osuus ajourien kokonaispituudesta ole rämeillä yli 10 %, korvissa vastaavasti yli 4 % (Suunnittelijan opas turvemaametsän kunnostukseen 2012). Menetelmillä 2 ja 3 keskimääräinen raiteenmuodostus pysyi 100 tonnin ylimenneeseen massaansa saakka 10 cm tasossa. Sadan tonnin ylimennyt massa merkitsee käytännössä hakkuukoneen ylitystä ja 2–3 ajokoneen kuormaa. Tällainen kuormitus on tyyppillinen keruu-urille. Sen sijaan varastolle tulevilla kokoojaurilla kuormitus ja sen myötä myös raiteenmuodostus on suurempi. Tällöin päädytään helposti yli 10 cm raiteen syvyyteen.

Tutkimuskohteen kaltaisissa suometsissä urille saadaan verraten rajallinen havutus. Nyt havutuksen paksuus oli parhaimmillaan keskimäärin vajaat 10 cm. Menetelmässä 1 urille kertynyt havutus oli hyvin vähäinen. Havutus vähentää raiteenmuodostusta, mutta kuormituksen kasvaessa raiteen syvyys kasvaa myös havutetuissa kohdissa. Ongelmana on usein, että heikosti kantavissa kohdissa myös hakkuukertymä ja sen myötä uralle saatava havutus on vähäinen.

Harvesterin raiteenmuodostus on merkittävä raiteenmuodostuksen selittäjä yhdessä mittauspisteen yli kulkeneen kokonaismassan kanssa. Yhteys antaa mahdollisuuden ennustaa, millaisella kokonaiskuormituksella esimerkiksi saavutetaan 10 cm raiteen syvyys. Tutkimuskohteella raidesyvyys harvesterin jälkeen oli noin 5 cm. Tällöin 10 cm raidesyvyys saavutetaan reilun 60 tonnin kokonaiskuormituksella.

Korjuujäljen ennustamisen osalta saatiin uutta tietoa. Leikkausmoduli, kivisyysrassin painuma ja havukerroksen paksuus olivat kaikki merkittäviä kantavuutta selittäviä tekijöitä. Turpeen ja juuriston kantavuusvaikutuksen yhdistävä piikkisiipikaira vaikuttaa lupaavalta laitteelta kantavuuden ennustamiseen.

Korjuujälkikysymykseen liittyvät osaltaan myös laskennalliset leimikkotason kertymävertailut, jotka tehtiin Motti-simulaattorilla. Menetelmässä 1 kertymän kokonaismassa on reilut 10 tonnia suurempi kuin menetelmissä 2 ja 3. Ero merkitsee käytännössä kahta lisäkuormaa metsäkuljetuksessa. Kun menetelmässä 1 havutus on vähäinen, riski raiteenmuodostukselle kasvaa. Menetelmissä 4 ja 5 hehtaarikertymän kokonaismassa on noin viisi tonnia suurempi kuin menetelmissä 2 ja 3, ja samalla keskimääräisen havutuksen määrä on vain jonkin verran pienempi. Raiteenmuodostusta ajatellen riskit ovat energiarangan korjuussa pienemmät kuin kokopuuna korjuussa. Jos energiapuuta halutaan korjata turvemaalta kesäaikana, menetelmä 5 vaikuttaa nyt vertailuista menetelmistä parhaimmalta vaihtoehdolta, kun kertymät ja toisaalta korjuujälkikysymykset otetaan huomioon.

Menetelmien ravinnetaloudellinen vertailu rajattiin hakkuutähteiden ja hakkuutähteissä kasvupaikalle jääneiden ravinnemäärien tarkasteluun. Mikäli haluttaisiin selvittää hakkuutapojen vaikutuksia puuston kasvuun ja ravinnetalouteen turvemaiden ensiharvennuksilla, tarvittaisiin järjestettyjä kokeita, joita seurataan pidemmän aikaa. Tutkimuksen selvin ja tärkein tulos oli se, että kaikissa tutkituissa korjuumenetelmissä koelohjelle jäi korjuun jälkeen merkittävä osuus hakkuutähteistä. Eniten hakkuutähteitä jäi ainespuuhakkuussa, vähiten integroidussa korjuussa, jossa energiapuuta otettiin talteen kokopuuna. Energiapuutakin talteenotettaessa 28–48 % hakkuutähteistä jäi metsään. Uusimmissa ohjeissa kivennäismaille ja turvemaille suositellaan jätettäväksi kolmasosa hakkuutähteistä, jotta kasvupaikalle jäisi riittävästi ravinteita turvaamaan jäljelle jääneiden puiden kasvua (Kuusinen ja Ilvesniemi 2009, Äijälä ym. 2010). Tutkimuskohteella suosituksen tavoitteet täyttyivät kaikilla vertailussa olleilla hakkuutavoilla. Myös aiemmin on todettu, että talviaikaan tehdyissä suometsien ensiharvennuksissa kokopuun korjuussakin hakkuutähteistä jää yli 30 % koelohjelle (Hytönen ja Moilanen 2012, Hytönen ym. 2010).

Maastossa punnittu hakkuutähteiden määrä oli yhtä tapausta lukuun ottamatta 21–48 % suurempi kuin poistuman puustotunnuksista laskettu määrä. Saattaa olla, että laskennallinen menetelmä aliarvioi maastoon jäävien hakkuutähteiden määrää. Esimerkiksi kokopuun korjuussa oksia katkeilee ja hakkuutähdettä voi jäädä kasvupaikalle runsaastikin (Hytönen ym. 2010). Ero saattaa myös johtua osin siitä, ettei katkosta kaikilla menetelmillä tapahtunut täysin ohjeitten mukaisesti.

Koaloille hakkuutähteisiin jääneiden ravinteiden määrä on suhteessa hakkuutähteiden määrään ja niiden jakautumiseen runkopuuhun, oksiin ja neulasiin. Ainespuun korjuussa metsään jäi hakkuutähteiden lisäksi myös eniten ravinteita. Typpi, fosfori, kalium ja boori ovat puuston kasvun kannalta keskeisimpiä ravinteita turvemaiilla. Turvemaiilla hakkuutähteiden sisältämän typen poistuminen kasvupaikalta ei ole ravinnetaloudellisesti merkittävää, koska metsänkasvatuskelpoisilla ojitetuilla soilla turpeeseen on sitoutunut runsaasti typpeä. Suometsien kokopuun korjuussa on oltu erityisesti huolestuneita kaliumin ja boorin kasvavasta poistumasta kasvupaikalta.

Tässä tutkimuksessa hakkuutähteissä jäi kaliumista energiapuun korjuun jälkeenkin 55–74 % kasvupaikalle. Siten tutkimuksen menetelmillä toteutettu energiapuun korjuu vähensi metsään jäävän kaliumin määrää ainespuun korjuuseen verrattuna 26–45 %. Tutkimukset ja laskelmat, joissa kokopuun korjuun on oletettu sisältävän kaikki oksat ja neulaset, yliarvioivat ravinnepoistumia. Esimerkiksi (Kaunisto 1996) laski kokopuun korjuuna tehtävän hakkuun lisäävän kaliumin poistumaa 10–15 kg/ha verrattuna normaaliin runkopuun korjuuseen, kun runkopuun kertymä on luokkaa 30–40 m<sup>3</sup>/ha (Kaunisto 1996). Tässä tutkimuksessa energiapuun korjuu lisäsi kaliumin poistumaa 6–17 kg/ha, kun runkopuukertymä oli kaksinkertainen (60 m<sup>3</sup>/ha).

Vaikka ravinteita jääkin turvemaiden kokopuun korjuussa kasvupaikalle enemmän kuin on oletettu, kokopuun korjuuta ei ole syytä tehdä kasvupaikoilla, joilla puilla esiintyy silmin havaittavia ravinnepuutoksia tai jotka ovat kaliumpuutoksen riskialueita (Ptkg/II- ja MtkgII-turvekankaat). Käyttämällä suositeltuja lannoitteita (RautaPK, tuhka) voidaan ravinnemenetykset korvata ja lisätä huomattavasti puuston kasvua (Huotari 2012).

## Kirjallisuus

- Ala-Ilomäki, J., Högnäs, T., Lamminen, S. & Sirén, M. 2011. Equipping a conventional wheeled forwarder for peatland operations. *International Journal of Forest Engineering* 22(1): 7–13
- Halonen, O. & Tulkki, H. 1981. Ravinneanalyysien työohjeet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 36. 23 s.
- Heikkilä, J. 2007. Turvemaiden puun kasvatus ja korjuu – nykytila ja kehittämistarpeet. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 43. 29 s. ISBN 978-951-40-2029-2 (PDF). Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp043.htm>.
- Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsälannoitteena. 47 s. ISBN 978-951-40-2371-2
- Hynynen, J., Ahtikoski, A., Siitonen, J., Sievänen, R. & Liski, J. 2005. Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production. *Forest Ecology and Management* 207: 5–18.
- Hyvän metsänhoidon suositukset 2006. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Julkaisusarja 22/2006. 100 s.
- Hytönen, J. & Moilanen, M. 2012. Effect of harvesting method on the amount and nutrient content of logging residues and nutrition of Scots pine in first thinnings on drained peatlands. *The Book of Abstracts (Ed. Mgnusson, T.). The 14th International Peat Congress. Peatlands In Balance. Stockholm, Sweden, June 3-8, 2012.* p. 207–208.
- Hytönen, J., Moilanen, M., Kohal, O. & Lokasaari, A. 2010. Hakkuutähteiden määrä ja ravinnesisältö aines- ja energiapuukorjuun jälkeen ojitettujen turvemaiden ensiharvennumänniköissä. Teoksessa: Sauvula-Seppälä, T., Ulander, E. & Tasanen, T. (toim.) 2010. Kehittyvä metsäenergia - Tutkimusseminaari Seinäjoen Framissa 18.11.2009. Seinäjoen ammattikorkeakoulun julkaisusarja B46: 70–79.
- Hyvän metsänhoidon suositukset turvemaille 2007. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 51 s.
- Högnäs, T. 2007. Nykykalustolla turvemaiden puunkorjuuseen -projektin tulokset. *Metsähallitus*. 41 s.

- Högnäs, T., Kumpare, T. & Kärhä, K. 2011. Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokitus. Metsätehon tulosalvosarja 3/2011. 10 s. [http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2011\\_03\\_Turvemaaharvennusten\\_korjuukelpoisuusluokitus\\_kk\\_th\\_tk.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_03_Turvemaaharvennusten_korjuukelpoisuusluokitus_kk_th_tk.pdf)
- Ihalainen, A. 2011. Millaisia suometsät ovat. VMI 10:n tuloksia soiden pinta-aloista sekä puuston tilavuudesta ja kasvusta. Uutta tietoa suometsätalouteen. Suometsätalous-tutkimusohjelman tulokset käytäntöön -seminaari. Sokos Hotelli Vantaa, Tikkurila. 12.04.2011.
- Kaunisto S. 1996. Massahakemenetelmä ja ravinnepoistuma rämeen ensiharvennusmänniköissä. Julkaisussa: Laiho, O. & Luoto, T. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Porissa 1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 593: 15–23.
- Kaunisto, S. & Paavilainen, E. 1988. Nutrient stores in old drainage areas and growth of stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 145. 39 s.
- Kaunisto, S. & Moilanen, M. 1998. Kasvualustan, puuston ja harvennuspoistuman sisältämät ravinnemäärät neljällä vanhalla ojitusalueella. *Metsätieteen aikakauskirja - Folia Forestalia* 3: 393–410.
- Koistinen A. & Äijälä, O. 2006. Energiapuun korjuu. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 40 s.
- Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. [Verkkajulkaisu]. Tapion ja Metlan julkaisuja. Saatavissa: <http://www.metsavastaa.net/energiapuunraportti>
- Moilanen, M., Piironen, M.-L. & Karjalainen, J. 1996. Turpeen ravinnevarat metsähallituksen vanhoilla ojitusalueilla. Julkaisussa: Piironen, M.-L. & Väärä, T. (toim.). Metsäntutkimuspäivä Kajaanissa 1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja – The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 598: 35–54.
- Mälkönen, E., Kukkola, M. & Finer, L. 2001. Energiapuun korjuu ja metsämaan ravinnetase. Teoksessa Nurmi, J. & Kokko, A. (toim.) Biomassan tehostetun talteenoton vaikutukset metsässä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 816: 31–52.
- Kärhä, K., Kumpare, T., Keskinen, S. & Petty, A. 2011. Ponsse Ergo/H7 rankapuun hakkuussa ensiharvennuksella. Metsätehon tulosalvosarja 1/2011. Metsäteho Oy & Metsähallitus. 43 s. [http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2011\\_01\\_PonsseErgoH7\\_kk\\_ym.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2011_01_PonsseErgoH7_kk_ym.pdf)
- Suunnittelijan opas turvemaametsän kunnostukseen 2012. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Käsikirjoitus. 49 s.
- Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Pirinen, P. & Drebs, A. 2005. A basic Finnish climate data set 1961 – 2000 – description and illustrations. Ilmatieteen laitos. Raportteja 2005:5. 27 s.
- Väätäinen, K., Ikonen, T., Ala-Ilomäki, J., Sirén, M., Lamminen, S. & Asikainen, A. 2012. Kuljettajaa opastavat älykkäät järjestelmät ja niiden käyttö koneellisessa puunkorjuussa. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 223. 40 s.
- Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja. 31 s.

## Liite 1. Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuusluokitus (Högnäs ym. 2011)

# Turvemaaharvennusten korjuukelpoisuus- luokitus 2011

Korjattavan kuvion kokonaispuusto, m <sup>3</sup> /ha	Korjuukohteen varastojärjestelyjen, muodon ja koon perusteella arvioitu kuormitus ajouraverkostolle *)		
	Pieni	Kohtalainen	Suuri
	Kantavuusluokka **)		
>170	1	2	3
170 – 120	2	3	TALVI
<120	3	TALVI	TALVI
<b>Korjaukset korjuukelpoisuusluokkiin:</b>			
<b>Pohjaveden syvyys:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Kohteissa, joissa <u>pohjavesi on alle 25 cm:n syvyydellä suon pinnasta</u>, käytetään yhtä luokkaa heikompaa kantavuutta.</li><li>• Jos korjuuta on edeltänyt <u>yli 4 viikkoa kestänyt kuiva kausi</u>, suunnittelutietojen kantavuus paranee toteutuksessa yhdellä luokalla.</li></ul>			
<b>Turpeen paksuus:</b> Kohteella, jossa <u>turvekerroksen paksuus on alle 75 cm</u> , kantavuus paranee yhdellä luokalla.			
*) Suuntaa-antava <b>keskimääräinen maastokuljetusmatka turvemaalla</b> : pieni <100 m, kohtalainen 100–200 m ja suuri >200 m.			
**) Edellytetään, että <b>hakkuutähteet hakataan ajouralle ja pienialaiset ja ajouraverkoston kriittiset kohdat vahvistetaan hakkuutähteillä tai muulla tavalla.</b>			