

# **Hieskoivikoiden avo- ja harvennushakkuun tuottavuus aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa joukkokäsittelymenetelmällä**

Juha Laitila, Pentti Niemistö ja Kari Väätäinen

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisutoiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

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

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

#### **Toimitus**

PL 18, 01301 Vantaa  
puh. 010 2111  
faksi 010 211 2102  
sähköposti [julkaisutoimitus@metla.fi](mailto:julkaisutoimitus@metla.fi)

#### **Julkaisija**

Metsäntutkimuslaitos  
PL 18, 01301 Vantaa  
puh. 010 2111  
faksi 010 211 2102  
sähköposti [info@metla.fi](mailto:info@metla.fi)  
<http://www.metla.fi/>

<b>Tekijät</b> Laitila Juha, Niemistö Pentti & Väättäin Kari			
<b>Nimeke</b> Hieskoivikoiden avo- ja harvennushakkuun tuottavuus aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa joukkokäsittelymenetelmällä			
<b>Vuosi</b> 2014	<b>Sivumäärä</b> 37 s.	<b>ISBN</b> 978-951-40-2462-7 (PDF)	<b>ISSN</b> 1795-150X
<b>Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet</b> Itä-Suomen alueyksikkö / Forestenergy2020 / 3561 Toimitusvarmat ja tehokkaat puubiomassan hankintaketjut metsästä loppukäyttäjälle			
<b>Hyväksynyt</b> Antti Asikainen, professori, 27.2.2014			
<b>Tiivistelmä</b> <p>Tutkimuksessa selvitettiin hieskoivikoiden avo- ja harvennushakkuun tuottavuus aines- ja energiapuun yhdistetyssä korjuussa joukkokäsittelymenetelmällä. Lisäksi mitattiin avohakkuussa palstalle jäävän hakkuutähteen määrä. Maastotöissä kerätyn aikatutkimusaineiston pohjalta selvitettiin ajankäytön rakenne sekä laadittiin ajanmenekkimallit harvennus- ja avohakkuulle. Ajanmenekkimalleissa hakkuun tuottavuutta selitettiin puun tilavuudella sekä hakkuupoistuman tiheydellä (poistuma runkoja hehtaarilta). Työn tuottavuus ilmaistiin kiintokuutiometreinä tehotunnissa (<math>m^3/E_0h</math>). Aikatutkimuksissa ainespuu korjattiin karsittuna ja energiaosite karsimattomana. Avohakkuukoaloilla puun keskitilavuus oli 16–96 <math>dm^3</math> ja harvennuskoaloilla 28–69 <math>dm^3</math>. Hakkuupoistuma aikatutkimuksissa oli yhteensä 5104 runkoa, josta 152 <math>m^3</math> oli koivukuitupuuta, 21 <math>m^3</math> mäntykuitupuuta ja 103 <math>m^3</math> kokopuuta. Avohakkuu paransi odotetusti työn tuottavuutta harvennushakkuuseen verrattuna mutta joukkokäsittelyn vaikutus työn tuottavuuteen oli vähäinen alhaisen joukkokäsittelyprosentin takia molemmilla hakkuutavoilla. Avohakkuun aikatutkimuskoaloilta mitattu tehotuntuottavuus oli alimmillaan 5,6 <math>m^3/E_0h</math> ja korkeimmillaan 17,4 <math>m^3/E_0h</math>. Vastaavasti harvennuksella tehotuntuottavuus oli 4,8–10,9 <math>m^3/E_0h</math>.</p> <p>Hieskoivun rungon mutkaisuus tekee siitä joukkokäsittelyyn huonosti sopivan kun käytetään syöttävää ja karsivaa hakkuulaitteita, minkä vuoksi hieskoivu oli usein valmistettava puutavaraksi yksinpuinkäsittelyä. Tavanomainen ongelma joukkokäsittelyssä on puiden eriaikainen syöttö, eli karsittavat puut menevät eri tahtia kouran läpi, mikä aiheuttaa ei toivottua vaihtelua karsitun puutavaran pituudessa ja latvaläpimitoissa.</p> <p>Aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa hieskoivikoiden avohakkuualalle jäi pääosin oksista koostuvaa hakkuutähdettä 1–5 tonnia/ha. Tämä vastasi 4–10 % koalapuustojen maanpäällisestä lehdeettömästä biomassasta ja arviolta 20–50 % niiden oksabiomassasta.</p> <p>Saadut tulokset ovat erittäin lupaavia ja puoltavat tutkitun hakkuutavan laajempaa soveltamista käytännön korjuutoimintaan. Tutkimuksessa nousi esille tarve parantaa nykyisten hakkuulaitteiden soveltuvuutta koivun ja muiden mutkaisten puiden hakkuuseen ja joukkokäsittelyyn, koska hakkuussa havaitun tuottavuushypäyksen taustalla oli lähinnä avohakkuun suomat harvennusta paremmat korjuuolosuhteet: 1) puukohtainen siirtymisaika pieneni kun samasta työpisteestä pystyi hakkaamaan selvästi enemmän puita kuin harvennuksella, 2) puiden poisto tapahtui systemaattisesti, 3) jäävä puusto ei hidastanut puiden karsintaa, katkontaa eikä kasausta. Metsäkuljetuksessa tuottavuus puolestaan paranee harvennusta suuremman hehtaarikertymän ja parempien työskentelyolosuhteiden kautta.</p>			
<b>Asiasanat</b> Hieskoivu, ojitusalueet, integroitu puunkorjuu, energiapuun, kuitupuun, ensiharvennukset, joukkokäsittely			
<b>Julkaisun verkko-osoite</b> <a href="http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp285.htm">http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp285.htm</a>			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
<b>Yhteydenotot</b> Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos, Yliopistokatu 6, 80101 Joensuu. Sähköposti: <a href="mailto:juha.laitila@metla.fi">juha.laitila@metla.fi</a>			
<b>Muita tietoja</b>			

## Sisällys

<b>1 Johdanto</b> .....	<b>5</b>
1.1 Hieskoivuvarat .....	5
1.2 Hieskoivun kasvatusvaihtoehdot .....	5
1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus .....	6
<b>2 Aineisto ja menelmät</b> .....	<b>7</b>
2.1 Komatsu 901.4 hakkuukone ja 350.1 hakkuulaite .....	7
2.2 Hakkuutyömaat ja aikatutkimuksen toteutus .....	8
2.3 Koealoilta hakatun puutavaran määrän mittaus .....	12
2.4 Korjuujäljen ja puustotietojen mittaus .....	13
2.5 Hakkuutähteiden mittaus avohakkuilta .....	16
<b>3 Tulokset</b> .....	<b>18</b>
3.1 Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit .....	18
3.2 Hakkuun tuottavuus koealoilla .....	18
3.3 Hakkuun ajanmenekkimallit harvennukselle ja avohakkuulle.....	20
3.4 Korjuujälki harvennushakkuissa .....	26
3.5 Palstalle jääneen hakkuutähteen määrä avohakkuussa.....	26
<b>4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset</b> .....	<b>28</b>
<b>Lähteet</b> .....	<b>32</b>

## 1 Johdanto

### 1.1 Hieskoivuvarat

Hieskoivu on Suomen yleisin lehtipuulaji. Valtakunnan metsien inventointitietojen mukaan metsissä kasvaa hieskoivua 250 miljoonaa kiintokuutiometriä ( $m^3$ ) ja rauduskoivua 75 miljoonaa kiintokuutiometriä (Niemistö ja Korhonen 2008). Kaikista puuvaroista hieskoivun osuus on 12 % ja rauduskoivun 3,6 %. Muita lehtipuulajeja on yhteensä lähes yhtä paljon kuin rauduskoivua (Niemistö ja Korhonen 2008). Koivun vuotuinen kasvu on 2000-luvulla ollut 15,5 miljoonaa  $m^3$  ja muiden lehtipuiden 4,4 miljoonaa  $m^3$  (Niemistö ja Korhonen 2008). Koivun kasvusta puolet kertyy Etelä-Suomen kivennäismailla, joilla raudus- ja hieskoivun osuudet kasvusta ovat yhtä suuret. Toinen puoli koivun kokonaiskasvusta, joka on pääasiassa hieskoivua, jakaantuu kolmeen likimain tasasuureen osuuteen Etelä-Suomen soiden sekä Pohjois-Suomen turve- ja kivennäismaiden kesken (Niemistö ja Korhonen 2008). Metsien kasvusta koivun osuus on suurempi kuin puuston tilavuudesta. Metsien kokonaiskasvusta koivun osuus on kivennäismailla 15 % ja soilla peräti 26 %. Etelä-Suomessa koivun osuus metsien kasvusta on 17 % ja Pohjois-Suomessa 20 % (Niemistö ja Korhonen 2008).

Hieskoivun tilavuudesta kaksi kolmannesta kasvaa sekametsissä. Hieskoivuvaltaiten metsien, joissa hieksen osuus on yli 50 % tilavuudesta, puusto on 82 miljoonaa  $m^3$  ja se jakaantuu puoleksi Pohjois- ja Etelä-Suomen sekä toisaalta turve ja kivennäismaiden kesken (Niemistö ja Korhonen 2008). Etelä-Suomessa hieskoivikoita on 0,5 miljoonaa hehtaaria, joista nuoria kasvatusemetsiä on 0,3 miljoonaa hehtaaria ja varttuneita kasvatusemetsiä on 0,1 miljoonaa hehtaaria. Pohjois-Suomessa hieskoivikoita on 0,65 miljoonaa hehtaaria, joista nuoria kasvatusemetsiä on 0,4 miljoonaa hehtaaria ja varttuneita kasvatusemetsiä 0,09 miljoonaa hehtaaria (Niemistö ja Korhonen 2008). Soilla koivuvaltaisuus on yleisempää kuin kivennäismailla. Hieskoivikoita on runsaimmin ojitusalueilla Pohjois-Pohjanmaan eteläosassa ja Meri-Lapissa, missä koivuvaltaisten metsien osuus metsämaasta on noin 20 % (Niemistö ja Korhonen 2008). Ojitettujen turvemaiden vuotuisiksi ensiharvennuspotentiaaliksi, kun mukaan potentiaalin lasketaan kasvatusemetsien harvennusrästien purku, on arvioitu 4,5 miljoonaa  $m^3$  ainespuuta (Bergroth ym. 2008). Vuositasolla ensiharvennuspinta-ala olisi 96 000 hehtaaria. Turvemaiden ensiharvennuspotentiaalista mäntyä on 50 %, kuusta 11 % ja koivua 39 %. Perinteisen ainespuun lisäksi ko. ensiharvennuksilta olisi mahdollista korjata energiapuuta vuosittain kokopuuna 2,43 miljoonaa  $m^3$  tai rankana 1,1 miljoonaa  $m^3$  (Bergroth ym. 2008). Suurin ensiharvennuspotentiaali sijaitsee Pohjois-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueella (Bergroth ym. 2008).

### 1.2 Hieskoivun kasvatusvaihtoehdot

Suurin osa hieskoivusta kasvaa sekapuuna, jolloin se on harvennuksissa väistytävä puulaji. Kangasmailla rauduskoivu on hieskoivua suositeltavampi sekapuulaji, mutta notkelmissa ja turvemaiden esiintyy pääasiassa hieskoivua. Sekametsissä ensiharvennuksen jälkeen koivun osuudeksi suositellaan noin 20 % ja myöhemmissä harvennuksissa ainakin hieskoivu pyritään poistamaan kokonaan (Niemistö 2008). Jos koivun osuus on jo alun perin suuri, sitä ei voida kokonaan poistaa harvennuksissa, jolloin hieskoivun ongelmaksi voi muodostua iän mukanaan tuoma ränsistyminen ennen havupuuston uudistuskypsyttää.

Puhtaisiin ja selvästi koivuvaltaisiin hieskoivikoihin on perinteisessä kuitupuukasvatuksessa suositeltu varovaista taimikonhoitoa tiheyteen 2500 kpl/ha ja sen jälkeen yhtä harvennuskertaa

13–15 metrin valtapituudessa harvennusmallin osoittamaan pohjapinta-alaan tai tiheyteen 1100 kpl/ha (Niemistö 1991). Kuitupuun kasvatuksessa hieskoivikon kiertoaika on noin 50 vuotta, mutta viljavan kasvupaikan hyvälaatuinen hieskoivikko maan eteläpuoliskossa voidaan tässä iässä vielä harventaa toisen kerran ja kasvattaa tukkipuuta noin 70 vuoden kiertoajalla. Kuusialikasvos koivikon uudistamisessa tai kaksijaksoisen metsän tavoittelu puoltaa useampia tai voimakkaampia harvennuksia (Niemistö & Poutiainen 2004).

Hieskoivujen järeytymistä edistävä harvennusreaktio on havaittu pienemmäksi kuin muilla puulajeilla, varsinkin turvamailla (Niemistö 2013). Hieskoivut sietävät myös varjostusta paremmin kuin rauduskoivut (Atkinson 1984, Ferm 1990). Harventamattomassa hieskoivutiheikössä Pohjanmaalla ja Lapissa elossa pysyneen puuston määrä on ollut 10 m valtapituudessa 16 000 kpl/ha, 14 m valtapituudessa 6000 kpl/ha ja 18 m valtapituudessa 3000 kpl/ha (Niemistö 2013). Kuitupuun mittoihin hieskoivikossa voidaan kasvattaa maksimissaan 2500–3000 koivua/ha ja hyvin tiheissäkin hieskoivikoissa kuitupuukokoista luonnonpoistumaa alkaa esiintyä merkittävästi vasta 40 ikävuoden jälkeen (Niemistö 1991 ja 2013).

Energiapuun arvon ja kysynnän lisääntyminen ovat tuoneet hieskoivikon kasvatukseen uuden varteenotettavan vaihtoehdon: Koivutiheikkö kasvatetaan ilman taimikonhoitoa ja harvennuksia päätehakkuuseen, joka tehdään noin 40 vuoden iässä joko pelkästään energiapuuksi tai integroituna korjuuna kuitu- ja energiapuuksi (Niemistö 2012). Hyvin lievällä nuoren koivikon harvennuksella voidaan toisinaan päästä hieman harventamatonta koivikkoa korkeampaan tuotokseen. Mahdollinen lisätulo ei kuitenkaan kata alle 8 m pituudessa tehdyn taimikonharvennuksen kustannuksia eikä myöskään myöhemmin koneellisesti tehdyn lievän energiapuuharvennuksen kustannuksia, koska kertymän määrä ja runkokoko ovat pienet. Voimakas harvennus puolestaan vähentää liikaa koivikon tulevaa kasvua. Harventamattomassa koivutiheikössä pienet puut ehtivät kuolla ennen päätehakkuuta, joten runkojen keskikoko päätehakkuussa ei ole oleellisesti pienempi eikä korjuukustannus siksi suurempi kuin lievästi harvennetussa hieskoivikossa (Niemistö 2012).

### 1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tässä tutkimuksessa selvitettiin aines- ja energiapuun yhdistetyn korjuun tuottavuus joukkokäsittelymenetelmällä, kun työ tehtiin keskiraskaalla hakkuukoneella. Lisäksi selvitettiin avohakkuussa palstalle jäävän hakkuutähteen määrä. Maastotöissä kerätyn aikatutkimusaineiston pohjalta selvitettiin ajankäytön rakenne sekä laadittiin ajanmenekkimallit harvennus- ja avohakkuulle yhdistelmämenetelmällä. Ajanmenekkimalleissa hakkuun tuottavuutta selitettiin puun tilavuudella sekä hakkuupoistuman tiheydellä (poistuma runkoja hehtaarilta). Työn tuottavuus ilmaistiin kiintokuutiometreinä tehotunnissa ( $m^3/E_0h$ ). Aikatutkimuksissa ainespuu korjattiin karsittuna ja energiaosite karsimattomana. Hakkuutyön mallintamiseen tarvittu aikatutkimusaineistoa koottiin Vaalan Veneheitossa vuoden 2013 aikana yhteistyössä Metsä-Groupin ja Pyhännän hakkuupalvelu Ay:n kanssa. Tutkimuksessa tuotettu tieto on käytettävissä kannattavuuslaskelmille hieskoivun eri kasvatusvaihtoehtojen vertailuun.

## 2 Aineisto ja menelmät

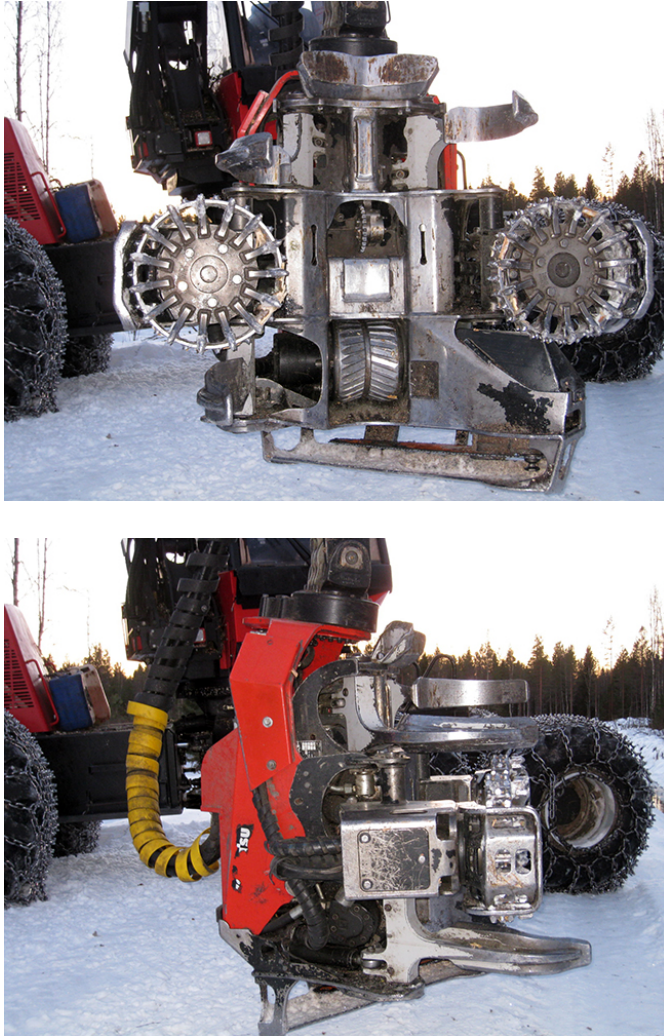
### 2.1 Komatsu 901.4 hakkuukone ja 350.1 hakkuulaite

Hakkuutyö tehtiin 6-pyöräisellä Komatsu 901.4 hakkuukoneella (Kuva 1), jossa oli Komatsu 350.1 hakkuulaite ja CRH nosturi. Hakkuukone oli vuosimallia 2011 ja sillä oli ajettu noin 6000 käyttötuntia. Konevalmistajan ilmoittamien tietojen mukaan hakkuukoneen paino on 15 100 kg ja 6-sylinterisen SisuDiesel 66 CTA-2V moottorin teho 150 kW (DIN). Nosturin maksimiulottuvuus on 10 metriä ja nostomomentti (brutto) 156,5 kNm. Komatsu 350.1 hakkuulaitteen (Kuva 2) paino on 960 kg ja suurin sahakatkaisuläpimitta on 600 mm. Hakkuulaitteen maksimiavauma on 520 mm ja suurin syöttönopeus on 5 m/s. Karsimateriaa on 4 kappaletta ja syöttörullia 3 kappaletta. Hakkuulaitteen leveys syöttörullat ja karsimaterät avattuina on 1400 mm ja korkeus kääntökehä mukaan lukien 1440 mm (Kuva 2).

Komatsu 350.1 hakkuulaitteessa ei ollut mekaanista joukkokäsittelylaitteistoa, vaan monirunkohakkuu tehtiin hakkuukoneen MaxiXplorer ohjausjärjestelmän sekä hakkuulaitteen karsimaterien ja syöttörullien avulla vuorottelemalla terien ja rullien avautumista. Monirunkohakkuu tapahtui niin, että syöttörullat pitivät kiinni hakkuulaitteeseen kerättyä runkoa/runkoja samalla, kun karsimaterät kouraisivat uuden rungon otteeseensa. Tämän jälkeen syöttörullat avautuivat hetkeksi ja tarttuvat kiinni kaadettavasta rungosta. Syöttörullien suljettua ja rungon tyven ollessa kokonaan hakkuulaitteen sisällä kuljettaja teki kaatosahauksen. Lopuksi kerätty kokopuunippu karsittiin kuitupuun osalta ja katkottiin kuljetuspituuteen.



**Kuva 1.** Komatsu 901.4 hakkuukone ja 350.1 hakkuulaite (J. Laitila/Metla).



**Kuva 2.** Komatsu 350.1 hakkuulaite (J. Laitila/Metla).

## 2.2 Hakkuutyömaat ja aikatutkimuksen toteutus

Tutkimus toteutettiin yhteistyössä Metsä Groupin ja Pyhännän hakkuupalvelu Ay:n kanssa neljällä hakkuutyömaalla maaliskuun 2013 ja joulukuun 2013 välisenä aikana Vaalan Veneheitossa. Hakkuutyömaat olivat Metsä Groupin ostamia hieskoivikoita (Kuva 3 ja 4). Tutkimuskoealojen hakkuusta ja puutavaran metsäkuljetuksesta vastasi Pyhännän hakkuupalvelu Ay. Tutkimukseen valituille hakkuutyömaille perustettiin 65 suorakaiteen muotoista hakkuukoealaa, joiden pituus oli 25 metriä ja koealan leveys oli koneen työskentelyleveys. Harvennushakkuukoealoja oli yhteensä 25 ja avohakkuukoealoja 40. Harvennus toteutettiin Tapion harvennusohjeiden mukaan. Suorakaiteen muotoisten hakkuukoealojen päätyrajat merkittiin maastoon koneen etenemissuunnassa kuitunauhan tai merkkimaalin avulla (Kuva 4). Perustetuista koealoista ei aiheutunut pysyviä jälkiä tai vaurioita maastoon tai puustoon. Hakkuun edetessä koealojen vaihtumiskohdat merkittiin lisäksi merkintämaalin, koealakeppien ja järjestysnumeroidujen koealalappujen avulla (Kuva 7). Koealojen sijoittelun tavoitteena oli, että puiden runkotilavuus ja hakkuupoistuman tiheys vaihtelevat koealojen välillä (Taulukko 1 & 2). Sekä talvi- että kesäkorjuun työmailla maasto oli tasaista ja maapohja kantavaa. Lämpötila talvihakkuissa oli -24–0 °C ja syyskesällä lämpötila oli 5–15 °C. Talvihakkuissa lunta oli 5–50 cm.





**Kuva 3.** Hieskoivukoeala ennen harvennusta (J. Laitila/Metla).

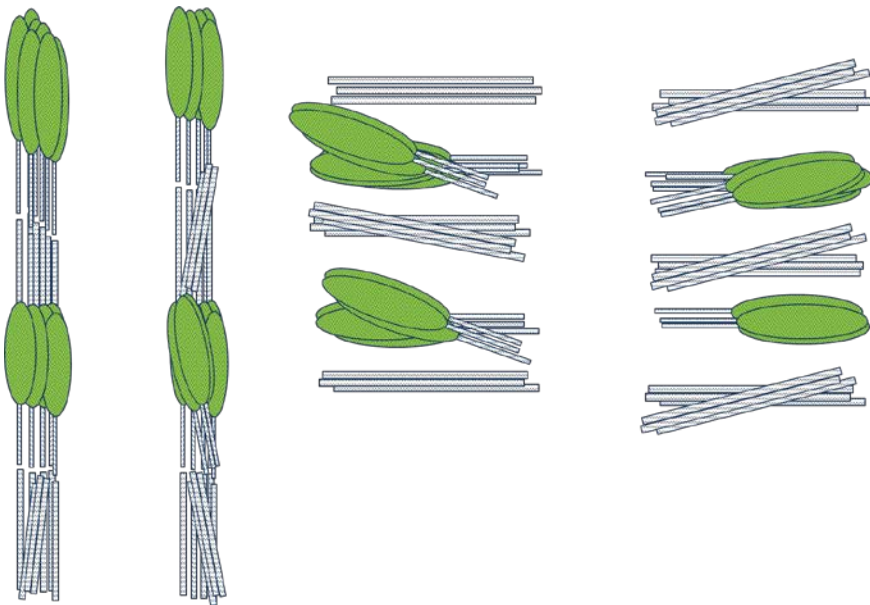


**Kuva 4.** Maastoon merkitty avohakkuukoealan raja (J. Laitila/Metla).

Hakkuutapana oli aines- ja energiapuun yhdistetty korjuu joukkokäsittelymenetelmällä. Kuitupuun minimilatuläpimitta oli 5–7 cm ja tavoitepituus 5 oli metriä (Kuva 5). Koivukuitupuu hakattiin omaan kasaan ja havukuitupuu (mänty ja kuusi) omaan kasaansa. Kuitupuun latvoista ja alamittaisista rungoista saatava energiaosite korjattiin 5–7 metriä pitkänä kokopuuna (Kuva 5). Avohakkuulla aines- ja energiapuuosite esikasattiin ajouran suuntaisiin kourakasoihin (Kuva 6 ja 7). Harvennuksella kourakasat sijaitsivat siten, että kourakasojen päät olivat ajouralle päin (Kuva 6).



**Kuva 5.** Avohakkuun aikatutkimuskoealoilta korjattua kokopuuta ja koivukuitupuuta (J. Laitila/Metla).



**Kuva 6.** Periaatekuva kuitupuun ja kokopuun kasauksesta avo- ja harvennushakkuun aikatutkimuskoealoilla. Avohakkuu kuvassa vasemmalla ja harvennushakkuu oikealla.



**Kuva 7.** Kuitupuuta ja kokopuuta kourakasoissa avohakkuun aikatutkimuskoealan rajalla (J. Laitila/Metla).

Aikatutkimusaineisto kerättiin jatkuvaan kelloaikatutkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä työvaiheet kirjataan niiden vaihtumisajankohdan mukaan (Nuutinen ym. 2008). Työvaiheiden ajanmenekit tallennettiin Rufco 901-maastotietokoneella sekunnin kymmenesosan tarkkuudella. Aikatutkimuksissa maastotyöntekijä oli hakkuukoneen takana riittävän turvaetäisyyden päässä siten, ettei hänestä aiheutunut haittaa hakkuutyön suorittamiselle. Maastotyöntekijällä oli hakkuutyömaalla vaadittavat turvavarusteet, eli oranssi huomioliivi sekä kuulosuojaimin varustettu turvakypärä.

Aikatutkimuksissa hakkuukoneiden työskentelyaika jaettiin seuraaviin hakkuukonetutkimuksissa yleisesti käytettyihin työvaiheisiin:

- Työpistesiiro
- Hakkuulaitteen vienti puun tyvelle (kourasyklin ensimmäinen puu)
- Keräilykaato / kaato yksinpuin ("kaatosahaus", runkojen keruu kouraan & kaato)
- Puunipun/puun tuonti prosessointipaikalle
- Prosessointi (karsinta ja katkonta)
- Pölkkyjen kasaus ja järjestely
- Peruuttaminen
- Raivaus
- Ajouran havutus yms. järjestelyt
- Häiriöt ja keskeytykset

Hakkuukokeeseen osallistuneella kuljettajalla oli noin 20 vuoden työkokemus hakkuutyöstä erityyppisillä hakkuukoneilla ja useiden vuosien työkokemus joukkokäsittelyhakkuusta ja yhdistetystä aines- ja energiapuun korjuusta. Kuljettaja oli erittäin taitava ja hakkuukone sekä hakkuulaite olivat hänelle entuudestaan tutut. Hakkuukokeet tehtiin päivänvalon aikaan kello 6:00 ja 17:00 välillä.

### 2.3 Koealoilta hakatun puutavaran määrän mittaus

Avo- ja harvennushakkuun aikatutkimuskoealoilta hakatun puutavaran määrän mittaus perustui kuormainvaakamittaukseen. Hakattu puutavara punnittiin kalibroidulla kuormainvaaka'alla metsäkuljetuksen yhteydessä kaksivaiheisesti. Ensimmäisen kerran puut punnittiin palstalla koealoittain (= kuormauksen kourataakkojen massojen yhteissumma per koeala) (Kuva 8). Toisen kerran koelan/koealojen puut punnittiin tienvarsivarastolla kuorman purkamisen yhteydessä (Kuva 9).

Mittaustulosten laskennassa purkamisen aikaisen punnituksen kuormakohtainen kokonaisuudessa jaettiin kunkin kuorman kuormastaakkojen punnitusten kokonaisuudella ja em. osamäärä oli korjauskerroin, jolla tarkennettiin kuormausvaiheessa saatuja aikatutkimuskoealakohtaisia punnitustuloksia. Metsäkuljetus tehtiin Ponsse Wisent kuormatraktorilla (Kuva 8 ja 9), jossa oli Ponsse LoadOptimizer kuormainvaaka. Kuormain oli mallia PonsseK70+. Metsäkuljetus tehtiin välittömästi hakkuukokeen päätyttyä. Metsäkuljetuksen yhteydessä mitatut tuoremassat muunnettiin kiintokuutiometreiksi Metsäntutkimuslaitoksen julkaisemilla tuoretiheysluvuilla (Lindblad ym. 2010, MMM:n asetus 2010). Vaalassa maaliskuussa tehdyissä koehakkuissa kuormainvaakamittauksen muuntokertoimet olivat koivukuitupuulla  $935 \text{ kg/m}^3$ , mäntykuitupuulla  $923 \text{ kg/m}^3$  ja koivu/sekakokopuulla  $900 \text{ kg/m}^3$ . Syyskuun aikatutkimuksissa vastaavat muuntokertoimet olivat  $866 \text{ kg/m}^3$ ,  $912 \text{ kg/m}^3$  ja  $900 \text{ kg/m}^3$  ja joulukuun aikatutkimuksissa muuntokertoimet olivat  $946 \text{ kg/m}^3$ ,  $959 \text{ kg/m}^3$  ja  $1000 \text{ kg/m}^3$ . Joulukuun hakkuissa energiaositteessa oli lunta ja jäätä, minkä vuoksi muuntokertoimenä käytettiin  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Lindblad ym. 2010).



**Kuva 8.** Puutavaran kuormainvaakamittauksen ensimmäinen vaihe palstalla kuormauksen yhteydessä (J. Laitila/Metla).



**Kuva 9.** Puutavaran kuormainvaakamittauksen toinen vaihe tienvarsivarastolla purkamisen yhteydessä (J. Laitila/Metla).

Hakkuupoistuma aikatutkimuksissa oli yhteensä 5104 runkoa, josta 152 m<sup>3</sup> oli koivukuitupuuta, 21 m<sup>3</sup> mäntykuitupuuta ja 103 m<sup>3</sup> kokopuuta. Em. määrästä avohakkuun aikatutkimuskoealoilta kertyi 3234 runkoa, josta 98,3 m<sup>3</sup> oli koivukuitupuuta, 9,2 m<sup>3</sup> mäntykuitupuuta ja 76,4 m<sup>3</sup> kokopuuta. Harvennuskoealoilta hakkuupoistuma oli puolestaan 1870 runkoa, josta 53,7 m<sup>3</sup> oli koivukuitupuuta, 11,5 m<sup>3</sup> mäntykuitupuuta ja 27,1 m<sup>3</sup> kokopuuta.

Metsäkuljetuksen kuormakoossa ei ollut eroja hakkuutapojen välillä. Kuormainvaakamittausten perusteella kokopuun metsäkuljetuksen kuormakoko oli 4,7 m<sup>3</sup> ja kuitupuun kuormakoko oli 9,3 m<sup>3</sup>, kun keskiarvo laskettiin täysien kuormien mukaan koko aineistosta.

## 2.4 Korjuujäljen ja puustotietojen mittaus

Harvennuskoealojen puustotiedot inventoitiin hakkuun jälkeen koealoittain ja niiltä mitattiin kasvatuskelpoisten puiden lukumäärä hehtaarilla (kpl/ha), keskiläpimitta 1,3 m korkeudelta (mm), valtapituus (m) sekä puuston pohjapinta-ala (m<sup>2</sup>/ha). Kasvatuskelpoiseksi puuksi luettiin kasvatettavaan jaksoon kuuluva elävä puu, jonka läpimitta oli vähintään 70 mm (Korjuujälki harvennushakkuussa... 2003). Mittaus suoritettiin ympyräkoealoilta, joiden säde oli 3,99 m (50 m<sup>2</sup>). Puustokoealoja sijoitettiin systemaattisesti kaksi jokaiselle harvennuskoealalle, yksi ajouran kummallekin puolelle (Kuva 10). Lähtöpuuston tiheys saatiin laskettua lisäämällä jäävän puuston runkolukuun harvennuskoealalta hakattujen runkojen kappalemäärä.

Hakkuupoistuman määrä ja rungon keskitilavuus määritettiin kuormainvaakamittauksen avulla. Avohakkuukoealoilla puun keskitilavuus vaihteli välillä 16–96 dm<sup>3</sup> (keskiarvo 58 dm<sup>3</sup>) ja hakkuupoistuman tiheys välillä 1253–4072 runkoa hehtaarilta (keskiarvo 1948). Hakkuukertymä oli 49–211 m<sup>3</sup>/ha (keskiarvo 111 m<sup>3</sup>/ha) (Taulukko 1). Harvennuskoealoilla puun keskitilavuus oli 28–69 dm<sup>3</sup> (keskiarvo 50 dm<sup>3</sup>) ja hakkuupoistuman tiheys vaihteli välillä 475–2101 runkoa hehtaarilta (keskiarvo 1408). Hakkuukertymä oli 23–109 m<sup>3</sup>/ha (keskiarvo 63 m<sup>3</sup>/ha) (Taulukko 2).

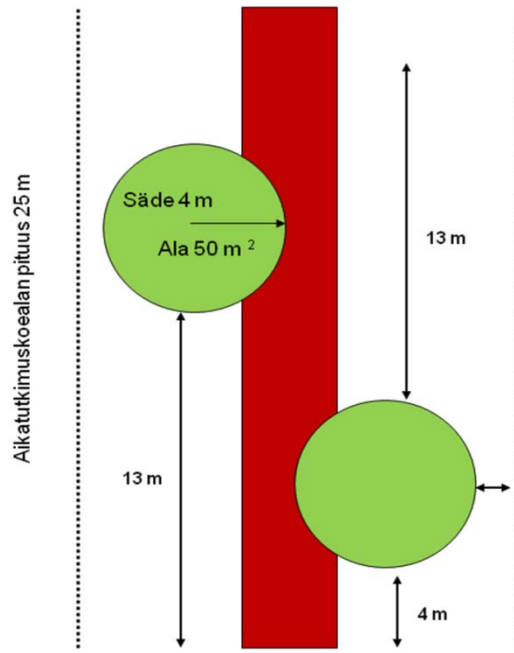
**Taulukko 1.** Avohakkuukoealojen puustotiedot hakkuukertymän osalta.

Avohakkuu- koeala	Poistuma puita hehtaarilta, kpl/ha	Hakkuu- kertymä, m <sup>3</sup> /ha	Poistuman keskikoko, dm <sup>3</sup>
1	1879	146	78
2	1711	111	65
3	1421	91	64
4	2096	104	50
5	1976	89	45
6	2289	81	35
7	1542	76	49
8	1759	59	34
9	1711	100	58
10	1590	85	53
11	1253	61	49
12	1470	92	62
13	1711	78	45
14	1783	107	60
15	1421	77	54
16	1807	117	65
17	1518	114	75
18	1735	101	58
19	1927	118	61
20	1446	77	53
21	2217	72	33
22	2409	75	31
23	2602	77	30
24	3228	105	33
25	1686	49	29
26	1807	58	32
27	1759	66	37
28	4072	66	16
29	2048	164	80
30	2168	181	84
31	2000	176	88
32	2241	147	66
33	2192	211	96
34	1662	153	92
35	1952	172	88
36	1494	91	61
37	2385	178	74
38	1446	119	82
39	2000	190	95
40	2506	196	78

**Taulukko 2.** Harvennuskoealojen puustotiedot jäävän puuston ja hakkuupoistuman osalta.

Harvennus- koeala	Lpm	Pituus	Ppa	Jäävä puusto, kpl/ha	Poistuma puita hehtaarilta, kpl/ha	Hakkuu- kertymä, m <sup>3</sup> /ha	Poistuman keskikoko, dm <sup>3</sup>
1	17	14,3	14	1000	2101	109	52
2	13	13,2	10	800	1126	33	29
3	14	11	15	1000	2050	82	40
4	15	12,9	13	800	1815	86	47
5	19	16,2	13	800	1529	94	62
6	14	14	14	1000	1681	76	45
7	16	13,4	14	1000	1822	73	47
8	13	16	13	1000	1782	102	68
9	12	14,9	10	800	1644	82	59
10	10	11,6	10	1000	1307	67	61
11	14	13,9	13	1000	1584	73	54
12	15	14,9	11	800	1307	77	69
13	11	13,4	14	1000	1782	75	50
14	11	12,8	13	800	1267	73	68
15	20	15,9	13	800	1960	109	65
16	14	14,2	14	1000	931	46	59
17	11	12	13	1000	1267	52	48
18	11	11	15	1000	1109	37	39
19	10	11,6	9	1000	1525	45	35
20	9	11,5	10	1200	1564	42	32
21	10	11,4	7	1000	970	23	28
22	9	11,6	7	1000	851	26	35
23	12	11,5	13	1200	475	24	60
24	10	12,9	9	1000	931	31	39
25	10	12,9	9	1000	812	35	50

Puustotietojen lisäksi hakkuutyömaalta mitattiin ajourien leveys ja ajouraväli (Korjuujälki harvennushakkuussa... 2003). Mittaukset tehtiin 40 metrin välein hakkuukoealoilta. Ajouran leveydellä (cm) tarkoitetaan ajouraa reunustavien lähimpien puiden kylkien kohtisuoraa etäisyyttä uran keskelle ja ajouravälillä (m) kahden rinnakkaisen ajouran keskilinjojen välistä kohtisuoraa etäisyyttä toisistaan (Korjuujälki harvennushakkuussa... 2003). Ajouraleveys mitattiin 10 metrin jaksolta määrittämällä uran oikealta ja vasemmalta puolelta lähimmän puun etäisyys ajouran keskilinjaan ja summaamalla nämä kaksi etäisyyttä yhteen (Björheden ja Fröding 1985). Uraleveys mitattiin aina, kun runkoluku oli yli 600 runkoa/ha (Korjuujälki harvennushakkuussa... 2003). Ajouraväli ja ajouran leveys mitattiin 10 cm tarkkuudella.

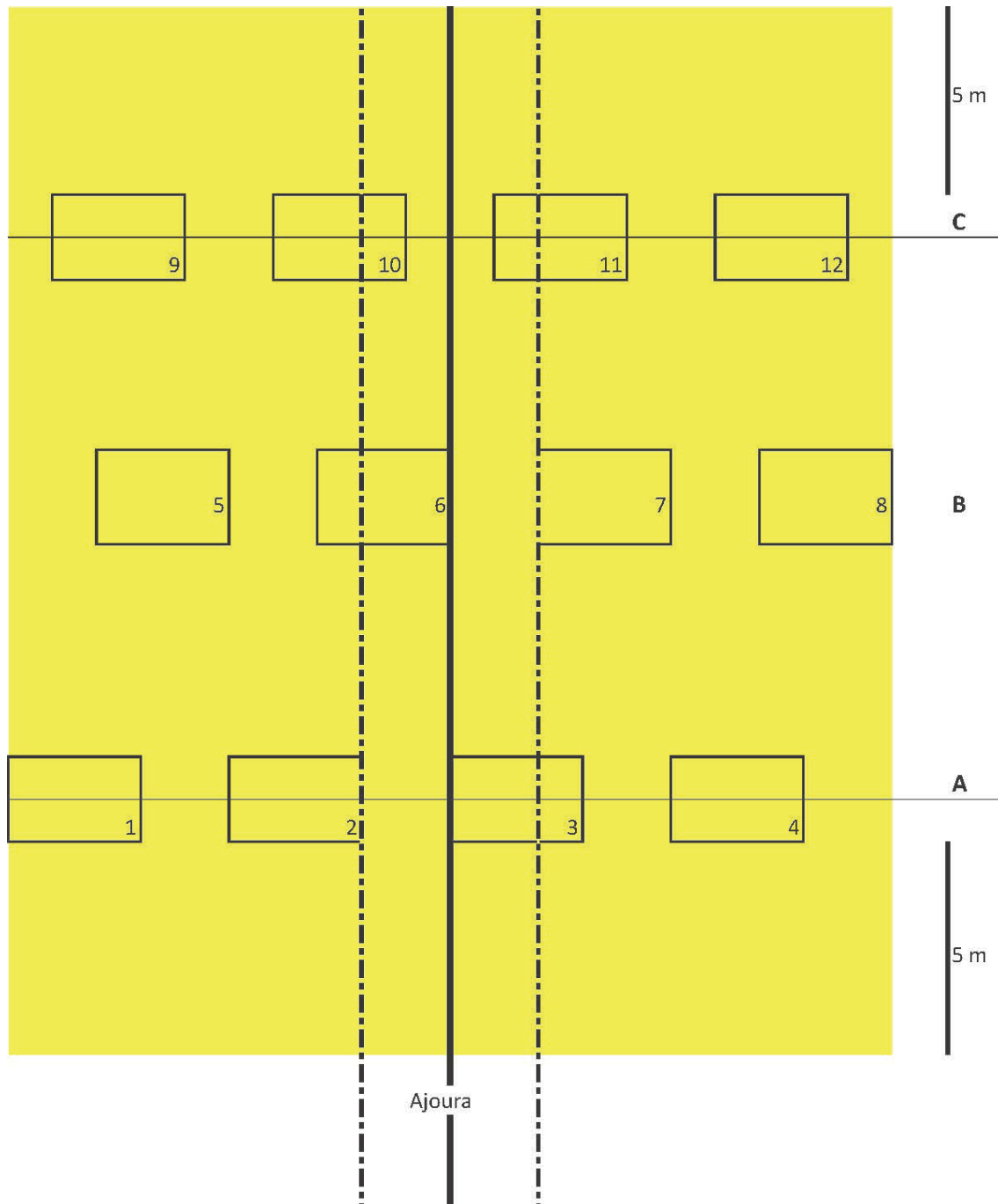


**Kuva 10.** Puustokoealojen sijoittuminen 20 m x 25 m harvennuskoealalle.

## 2.5 Hakkuutähteiden mittaus avohakkuilta

Talvihakkuiden jäljiltä mitattiin koealoille jääneiden hakkuutähteiden biomassa 24 avohakkuukoelalta. Kultakin koealalta hakkuutähteet kerättiin tarkasti lumesta 12:lta 2\*3 metrin suuruiselta näyteruudulta, jotka edustivat tasapuolisesti koko 20 metrin levyisen koealan pinta-alaa (Kuva 11). Palstalle satunnaisesti jäänyt hukkarunkopuu katkaistiin moottorisahalla ruudun rajalta ja sisäpuolelle osunut osa punnittiin erillään muusta hakkuutähteestä. Kerätyt hakkuutähteet punnittiin tuorena 100 g tarkkuudella ja joka neljänneltä ruudulta otettiin näyte kuivapainon mittausta varten. Nämä näytteet punnittiin maastossa 10 g tarkkuudella ja pakattiin muovipussiin ja säilytettiin tuoreina laboratorion kylmiössä. Ennen kuivatusta näytteiden tuorepaino mitattiin uudelleen. Näytteitä kuivattiin +105 °C:n lämpötilassa kolme vuorokautta, minkä jälkeen niiden kuivapaino määritettiin. Punnitukset laboratoriossa tehtiin 1 gramman tarkkuudella. Koealakohtaisena keskiarvona lasketuilla muuntokertoimilla päästiin maastossa punnituista tuorepainoista hakkuutähteen hehtaarikohtaisiin kuivapainoihin. Avohakkuualojen hakkuutähteen kuivamassalle (Mg/ha) ilman hukkarunkopuuta tehtiin lineaarinen regressiomalli, jossa selittäjänä käytettiin hakkuupoistuman puustotunnuksia. Palstalle jääneen runkopuun esiintyminen pienillä tutkimusruuduilla oli niin sattumanvaraista, että sen määrälle laskettiin ainoastaan keskimääräinen osuus hakkuupoistumasta.



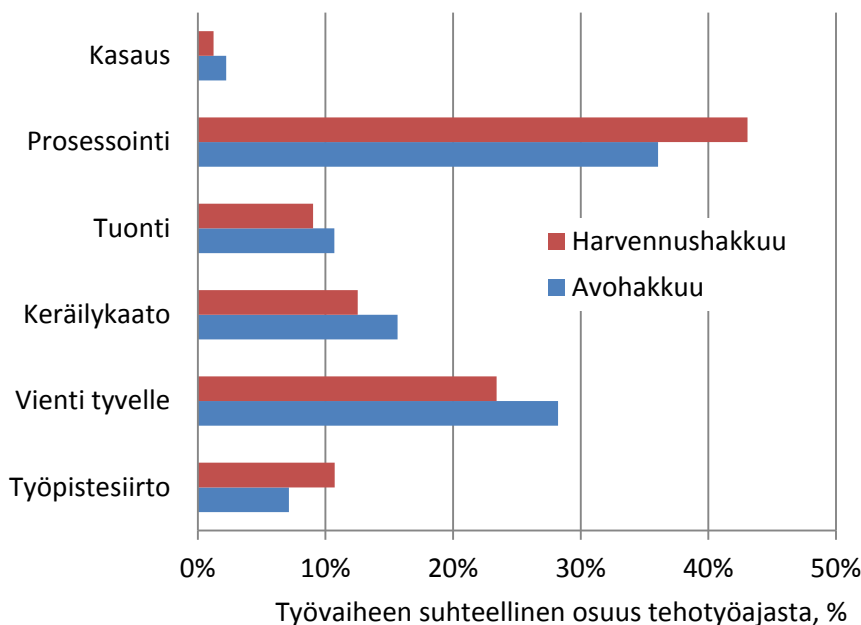


**Kuva 11.** Hakkuutähteen mittauksessa käytettyjen näyteruutujen sijainti koelalla.

### 3 Tulokset

#### 3.1 Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit

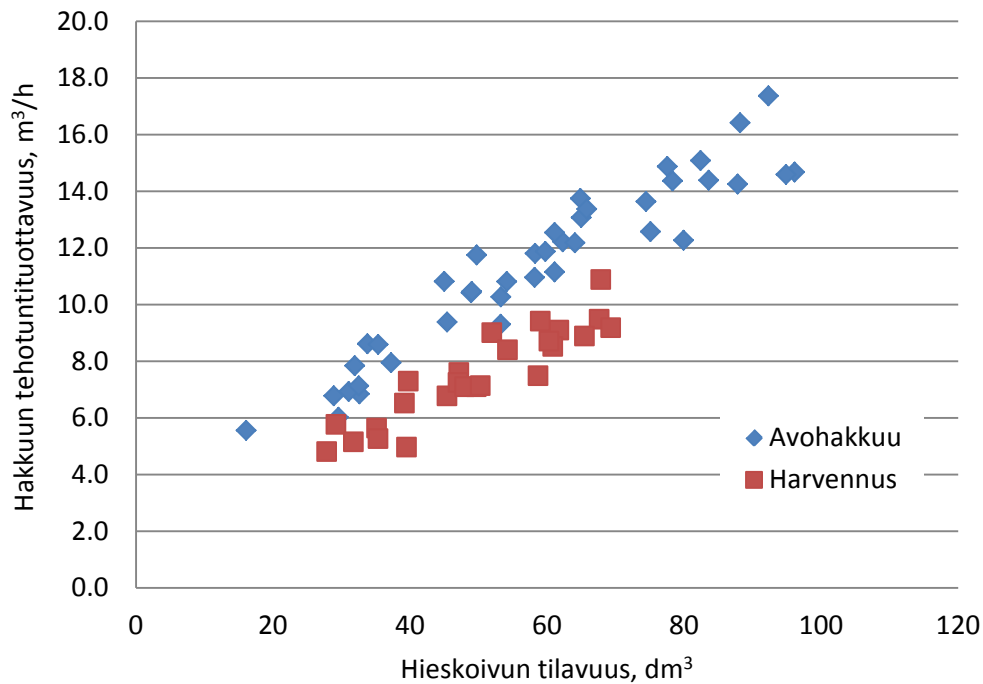
Puiden prosessointiin, eli karsintaan, katkontaan ja kasaukseen kului hieskoivun harvennushakkuulla tehotyöajasta 43 % ja avohakkuulla prosessoinnin osuus oli 36 % tehotyöajasta (Kuva 12). Kouran vientiin ensimmäisen kaadettavan puun tyvelle käytettiin harvennuksella 23 % ja avohakkuulla 28 % tehotyöajasta. Puiden keräilykaadolla vastaavat ajanmenekit olivat 13 % ja 16 % (Kuva 12). Kaadetun puun tai puunipun tuontiin karsinta- ja katkontapaikalle kului tehotyöajasta 9–11 % ja hakkuukoneen siirtoihin työpisteellä tai työpisteeltä toiselle käytettiin tehotyöajasta 7–11 %. Pölkkyjen kasaukseen tms. järjestelyihin käytettiin tehotyöajasta 1–2 % (Kuva 12).



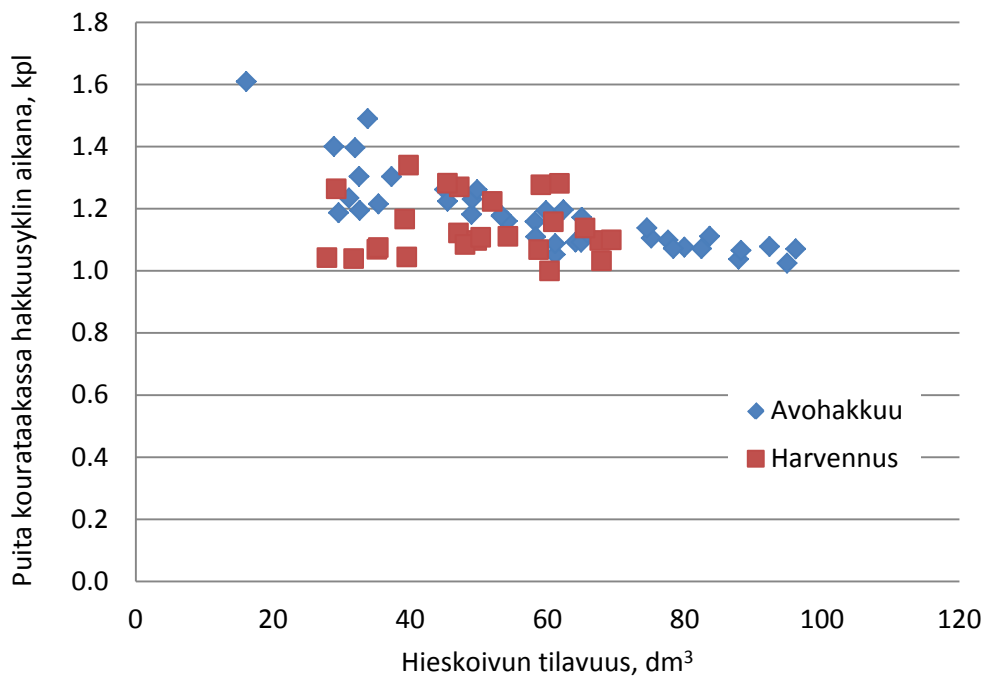
**Kuva 12.** Päätyövaiheiden suhteelliset ajanmenekit tehotyöajasta koko aineiston perusteella hakkuutavoittain.

#### 3.2 Hakkuun tuottavuus koealoilla

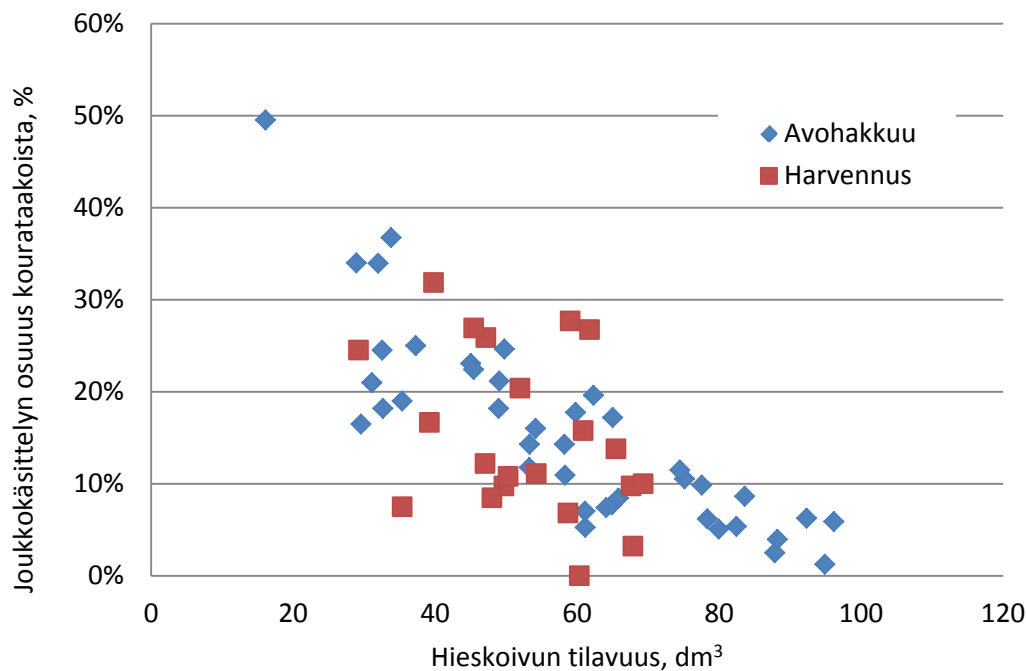
Avohakkuu paransi työn tuottavuutta harvennushakkuuseen verrattuna ja tuottavuus parani molemmilla hakkuutavoilla puuston järeytyessä (Kuva 13). Avohakkuun aikatutkimuskoealoilta mitattu tehotuntituottavuus oli alimmillaan 5,6 m<sup>3</sup>/E<sub>0</sub>h ja korkeimmillaan 17,4 m<sup>3</sup>/E<sub>0</sub>h. Vastavasti harvennuksella tehotuntituottavuus vaihteli välillä 4,8–10,9 m<sup>3</sup>/E<sub>0</sub>h. Avohakkuukoealoilla puun keskitilavuus oli 16–96 dm<sup>3</sup> ja harvennuskoealoilla 28–69 dm<sup>3</sup> (Kuva 13). Puun koko vaikutti hakkuulaitteeseen sopivien runkojen kappalemäärään, minkä vuoksi puun keskikoon kasvu laski runkojen määrää kourataakassa ja vastaavasti puun keskitilavuuden pieneneminen nosti sitä. Avohakkuulla ja harvennuksella keskimääräinen taakkakoko oli alimmillaan yksi runko ja avohakkuulla se oli korkeimmillaan 1,6 runkoa/taakka ja harvennuksella 1,3 runkoa/taakka (Kuva 14). Joukkokäsittelymenetelmällä hakattujen kourataakkojen osuus kourasykliä kokonaismäärästä oli avohakkuukoealoilla ylimmillään 50 % ja alimmillaan 1 % (Kuva 15). Harvennuksella joukkokäsittelyn osuus vaihteli välillä 0–32 % (Kuva 15).



**Kuva 13.** Avo- ja harvennushakkuun tehotuntuottavuus aikatutkimuskoealoittain.



**Kuva 14.** Puita kourassa hakkuusyklin aikana avo- ja harvennushakkuussa keskimäärin hakkuupoistuman keskitilavuuden mukaan.



**Kuva 15.** Hakkuupoistuman keskitilavuuden vaikutus joukkokäsittelynä hakattujen kourataakkojen osuuteen.

### 3.3 Hakkuun ajanmenekkimallit harvennukselle ja avohakkuulle

Joukkokäsittelyhakkuun ajanmenekin mallinnuksessa työvaiheet koottiin kolmeksi päätyövaiheeksi, jotka olivat työpistesiiirtyminen (Kuva 16), hakkuulaitteen vienti, keräilykaato & tuonti (Kuva 17 ja 18) sekä prosessointi (Kuva 19). Päätyövaiheet mallinnettiin erikseen harvennukselle ja avohakkuulle.

Hakkuutyön mallinnuksessa työpistesiiirtymisen ( $T_{\text{Työpistesiiirto}}$ ) ajanmenekkiä selitettiin hakkuupoistuman tiheydellä, puuta/ha (Kuva 16). Poistuman tiheyden kasvaessa puukohtainen työpistesiiirtymisen ajanmenekki pieneni, kun samasta työpisteestä voitiin käsitellä useampia runkoja. Mallinnuksessa ajanmenekkiin laskettiin mukaan työpistesiiirtoon sekä peruutteluun ajouralla kulunut aika. Harvennuksella työpistesiiirtymisen ajanmenekkimalli oli muotoa:

$$T_{\text{Työpistesiiirto H}} = 6,873 - 0,605 \ln(x_1)$$

jossa,

$$T_{\text{Työpistesiiirto H}} = \text{puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki harvennuksella, s}$$

$$x_1 = \text{hakkuupoistuman tiheys harvennuksella, puuta/ha}$$

$$\text{Mallin selityssaste, } r^2 = 0,141$$

Avohakkuulla työpistesiiirtymisen ajanmenekkimalli oli muotoa:

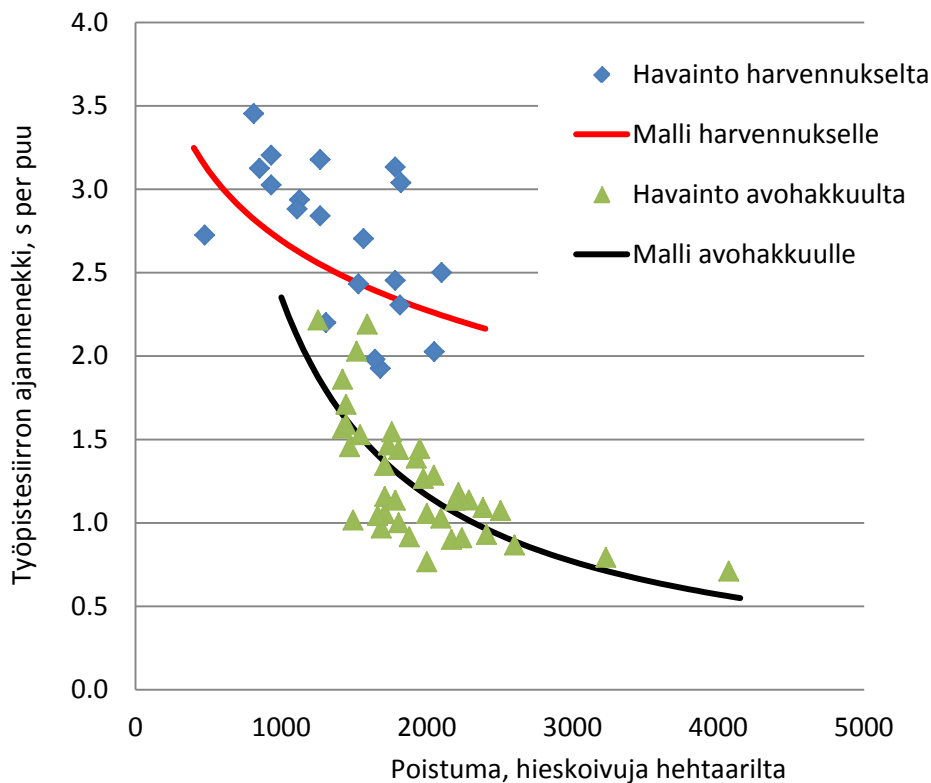
$$T_{\text{Työpistesiiirto A}} = -0,023 + 2375,177 * 1/x_1$$

jossa,

$$T_{\text{Työpistesiiirto A}} = \text{puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki avohakkuulla, s}$$

$$x_1 = \text{hakkuupoistuman tiheys avohakkuulla, puuta/ha}$$

$$\text{Mallin selityssaste, } r^2 = 0,544$$



**Kuva 16.** Hakkuupoistuman tiheyden vaikutus työpistesiiirtymisen tehoajanmenekkiin, sekuntia per puu.

Hakkuulaitteen vienti puulle, puiden keruu hakkuulaitteeseen sekä puunipun tuonti prosessointipaikalle mallinnettiin yhtenä työvaiheena ja sen ajanmenekki laskettiin keskiarvona puuta kohti. Hakkuulaitteessa olevien puiden kappalemäärä per kourasykli ( $N_{\text{Puuta kourassa}}$ ) laskettiin puun keskitilavuuden mukaan (Kuva 17). Hakkuulaitteen viennin, keräilykaadon ja puunipun tuonnin runkokohtainen ajanmenekki ( $T_{\text{Vienti, keräilykaato \& tuonti}}$ ) mallinnettiin puolestaan kourassa olevien puiden kappalemäärän mukaan (Kuva 18). Aikatutkimusaineiston pohjalta laaditut mallit olivat harvennukselle muotoa:

$$N_{\text{Puuta kourassa } H} = 1,064 + 3,96 * 1/x_2$$

jossa,

$$N_{\text{Puuta kourassa } H} = \text{puuta kourassa keskimäärin, kpl}$$

$$x_2 = \text{puun keskitilavuus harvennuksella, dm}^3$$

$$\text{Mallin selitysaste, } r^2 = 0,049$$

$$T_{\text{Vienti, keräilykaato \& tuonti } H} = 12,456 - 1,667x_3$$

jossa,

$$T_{\text{Vienti, keräilykaato \& tuonti } H} = \text{puukohtainen viennin, keräilykaadon ja tuonnin ajanmenekki, s}$$

$$x_3 = \text{puuta kourassa keskimäärin, kpl}$$

$$\text{Mallin selitysaste, } r^2 = 0,032$$

Avohakkuulla mallit olivat muotoa:

$$N_{\text{Puita kourassa A}} = 0,958 + 11,044 * 1/x_2$$

jossa,

$N_{\text{Puita kourassa A}}$  = puita kourassa keskimäärin, kpl

$x_2$  = puun keskikoko avohakkuulla,  $\text{dm}^3$

Mallin selityssaste,  $r^2 = 0,768$

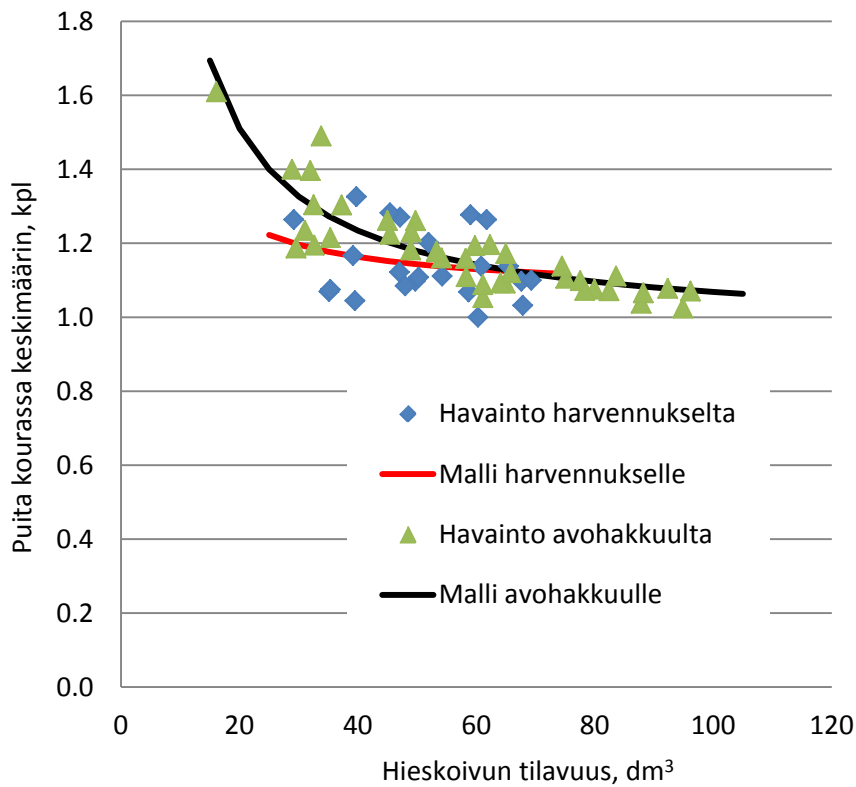
$$T_{\text{Vienti, keräilykaato & tuonti A}} = 12,599 - 2,455x_3$$

jossa,

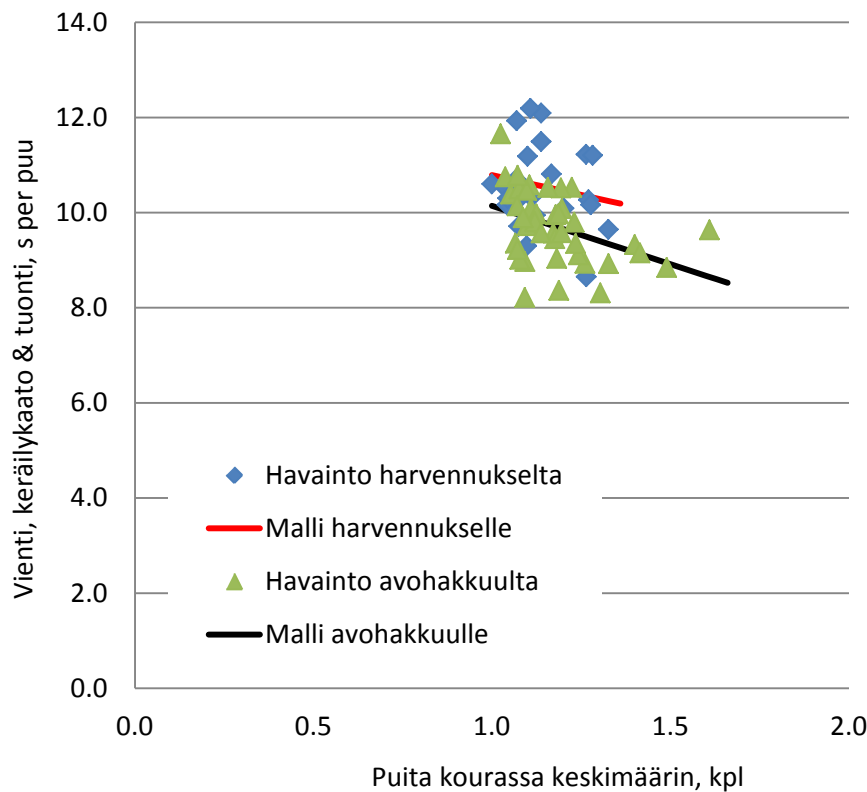
$T_{\text{Vienti, keräilykaato & tuonti A}}$  = puukohtainen viennin, keräilykaadon ja tuonnin ajanmenekki, s

$x_3$  = puita kourassa keskimäärin, kpl

Mallin selityssaste,  $r^2 = 0,167$



**Kuva 17.** Hakkuupoistuman keskitilavuuden vaikutus puiden kappalemäärään kourassa.



**Kuva 18.** Kouran viennin, keräilykaadon ja puunipun tuonnin puukohtainen tehoajamenekki kourassa olevien puiden kesvikappalemäärän mukaan.

Karsinnan, katkonnan ja kasauksen ajanmenekille laadittiin malli ( $T_{Karsinta, katkonta \& kasaus}$ ), jossa ajanmenekkiä selitettiin hakkuussa poistuvan puuston keskitilavuudella (Kuva 19). Harvennukselle laadittu ajanmenekkimalli oli muotoa:

$$T_{Karsinta, katkonta \& kasaus H} = 4,628 + 0,116x_2$$

jossa,

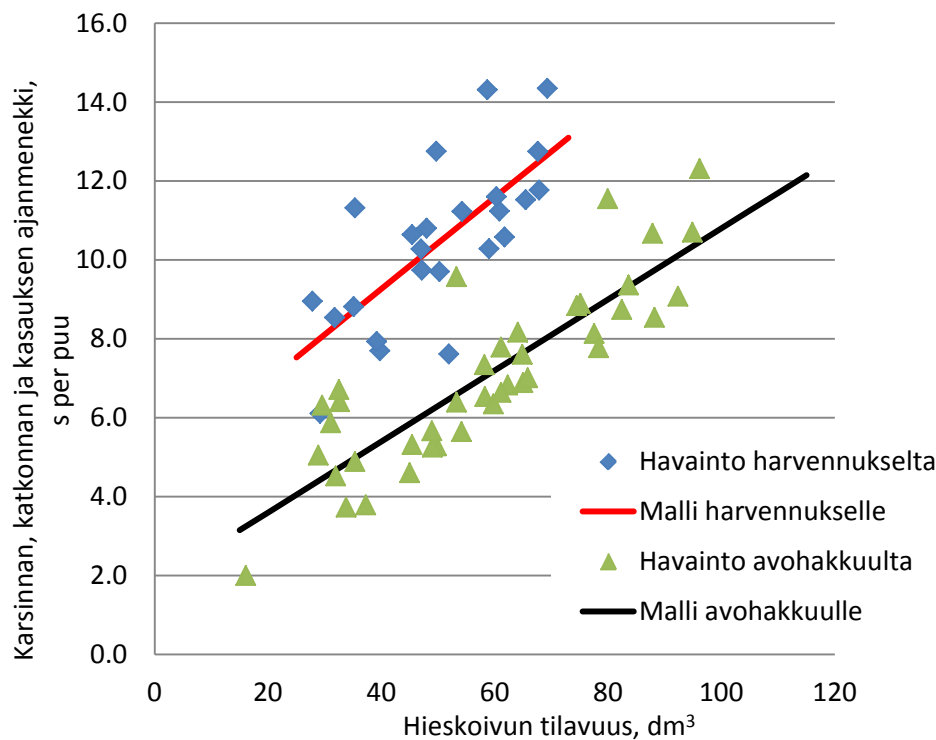
$T_{Karsinta, katkonta \& kasaus H}$  = karsinnan, katkonnan ja kasauksen ajanmenekki puulle, s  
 $x_2$  = puun keskikoko harvennuksella,  $dm^3$   
 Mallin selitysaste,  $r^2 = 0,514$

Avohakkuulla malli oli muotoa:

$$T_{Karsinta, katkonta \& kasaus A} = 1,799 + 0,09x_2$$

jossa,

$T_{Karsinta, katkonta \& kasaus A}$  = karsinnan, katkonnan ja kasauksen ajanmenekki puulle, s  
 $x_2$  = puun keskikoko avohakkuulla,  $dm^3$   
 Mallin selitysaste,  $r^2 = 0,738$



**Kuva 19.** Karsinnan, katkonnan ja kasauksen tehoajanmenekki puun keskitilavuuden mukaan.

Joukkokäsittelyhakkuun puukohtainen ajanmenekki sekunteina ( $T_{Puu}$ ) saatiin osatyövaiheiden summana:

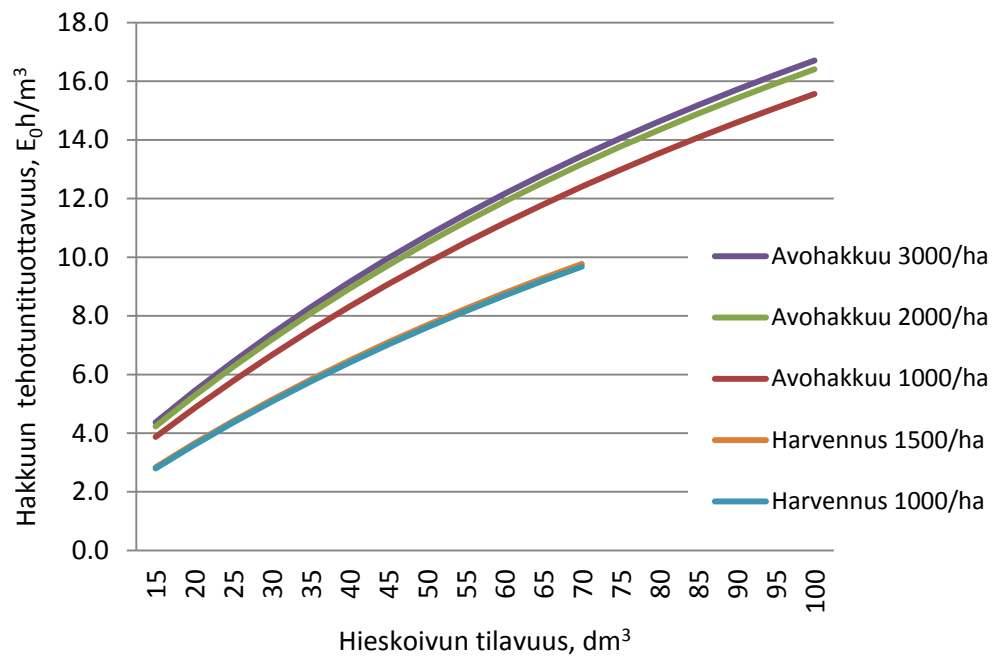
$$T_{Puu} = T_{Työpistesiiro} + T_{Vienti, keräilykaato & tuonti} + T_{Karsinta, katkonta & kasaus}$$

Joukkokäsittelyhakkuun tehotuntituottavuus hakattuina puina (kpl/ $E_0h$ ) laskettiin jakamalla 3600 sekuntia (= 1 tunti) puukohtaisella tehoajanmenekillä ( $T_{Puu}$ ). Hakattuina puina ilmoitettu tehotuntituottavuus muutettiin kiintokuutiometrikohtaiseksi tehotuntituottavuudeksi ( $m^3/E_0h$ ) kertomalla tehotunnissa hakattujen puiden kappalemäärä kokopuun kiintotilavuudella ( $m^3$ ).

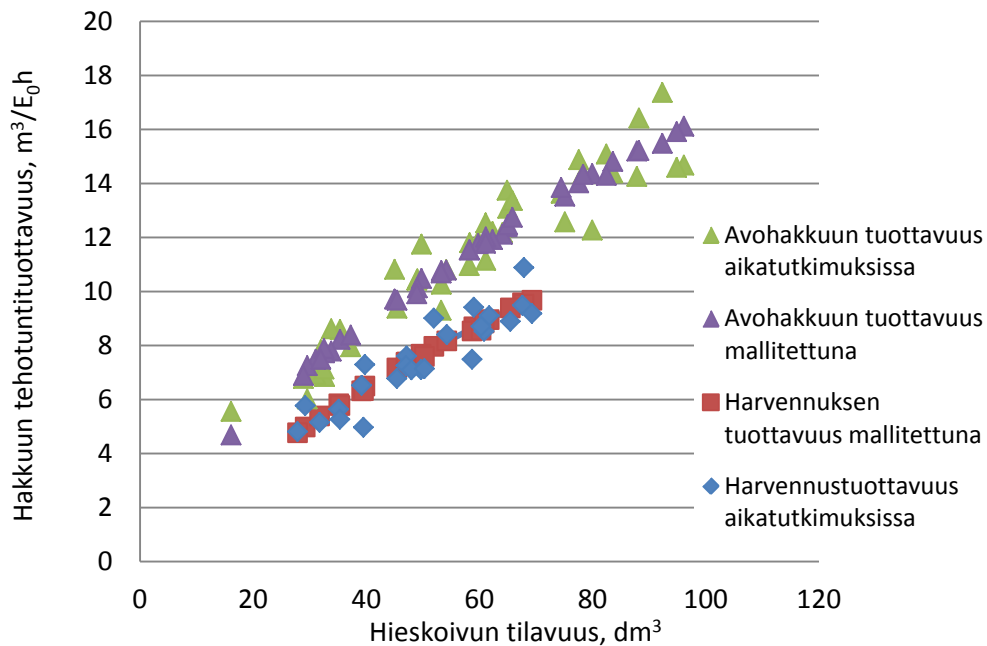
Kuvassa 20 laskettiin ajanmenekkimallien avulla hieskoivun avo- ja harvennushakkuun tehotuntituottavuus puun keskitilavuuden ja hakkuun hehtaarihoistuman mukaan. Avohakkuulla hoistuman tiheys oli 1000, 2000 tai 3000 runkoa hehtaarilta ja harvennuksella 1000 tai 1500 runkoa hehtaarilta. Avohakkuulla hieskoivun keskikoko vertailulaskelmassa oli 15–100  $dm^3$  ja harvennuksella 15–70  $dm^3$ . Tulosten mukaan hakkuuhoistuman tiheydellä on normaaliolosuhteissa lähinnä nimellinen vaikutus avo- tai harvennushakkuun tuottavuuteen, kun taas puuston järeytyminen paransi hakkuun tuottavuutta lähes suoraviivaisesti (Kuva 20). Avohakkuun tehotuntituottavuus oli harvennushakkuuseen verrattuna 56–38 %, eli noin 1,6–3,8  $m^3/E_0h$  korkeampi (Kuva 20).

Kuvassa 21 verrattiin ajanmenekkimalleilla laskettuja tuloksia avo- ja harvennushakkuun aikautkimuskoealoilla havaittuihin tuottavuuksiin. Kuvan perusteella voi todeta, että laaditut mallit sopivat hyvin aineistoon eikä malleissa ole havaittavissa systemaattista yli tai aliarviota (Kuva 21).





**Kuva 20.** Avo- ja harvennushakkuun tehotuntituottavuus hieskoivun keskitilavuuden ja hakkuupoistuman tiheyden mukaan.



**Kuva 21.** Aikatutkimuksessa havaittujen tuottavuuksien vertailu ajanmenekkimalleilla laskettuihin tuottavuuksiin avo- ja harvennushakkuussa.

### 3.4 Korjuujälki harvennushakkuissa

Keskimääräinen ajouraväli oli ensimmäisellä harvennustyömaalla 23,8 m (keskihajonta 2,1 m) ja toisella työmaalla se oli 20,2 (keskihajonta 2,4 m). Mittausten perusteella voi todeta, että harvennuskoealoilla ajouraväli oli korjuusuositusten mukainen eli vähintään 20 metriä (Korjuujälki harvennushakkuissa... 2003). Hakkuukoealoilla 1–6 pinta-alat laskettiin 23,8 m ajouravälin mukaan ja lopuilla koealoilla hakkukaistan leveys tulosten laskennassa oli 20,2 metriä. Ajouran leveys oli harvennustyömailla keskimäärin 422 cm (keskihajonta 25 cm) ja se on hieman enemmän kuin suosituksissa mainittu 4,0 metriä (Korjuujälki harvennushakkuissa... 2003). Avohakkuilla hakkukaistan leveysmittausten keskiarvo oli 16,6 metriä (keskihajonta 1,0 m) ja tulosten laskennassa avohakkuukoealojen pinta-alat laskettiin 16,6 metrin ajouravälin mukaan.

### 3.5 Palstalle jääneen hakkuutähteen määrä avohakkuussa

Integroidussa korjuussa kuitupuu tehtiin karsittuna ja ainespuun latvat sekä alamittaiset rungot korjattiin energiapuuksi karsimattomina. Tällä työtavalla energiaosite koostui karsitun ainespuun oksista ja latvahukkapuusta sekä yksittäisistä kokopuurungoista. Korjuussa palstalle jääneen hakkuutähteen kuivamassalle (Mg/ha) tehtiin lineaarinen regressiomalli, jossa selittäjinä käytettiin hakkuupoistuman puustotunnuksia. Palstalle jääneen runkopuun määrä oli sattumanvaraista, joten sen osuus jätettiin pois mallista, ja sen määrälle laskettiin ainoastaan keskimääräinen osuus hakkuupoistumasta.

Avohakkuulla hakkuutähteen määrää kuvaavassa mallissa selittävinä puustotunnuksina olivat poistuman tilavuus ja runkoluku. Selittäjien yhteisvaihtelu oli aineistossa pieni ( $R = -0,18$  koko aineistossa, mutta  $R = 0,03$  mikäli yksi hyvin tiheä ja pienipuustoinen koeala jätettiin korrelaatiotarkastelusta pois).

Hakkuutähdemalli on muotoa:

$$B_{\text{Hakkuutähde}} = 2,24 + 0,0145 * V + 0,00041 * N$$

jossa,

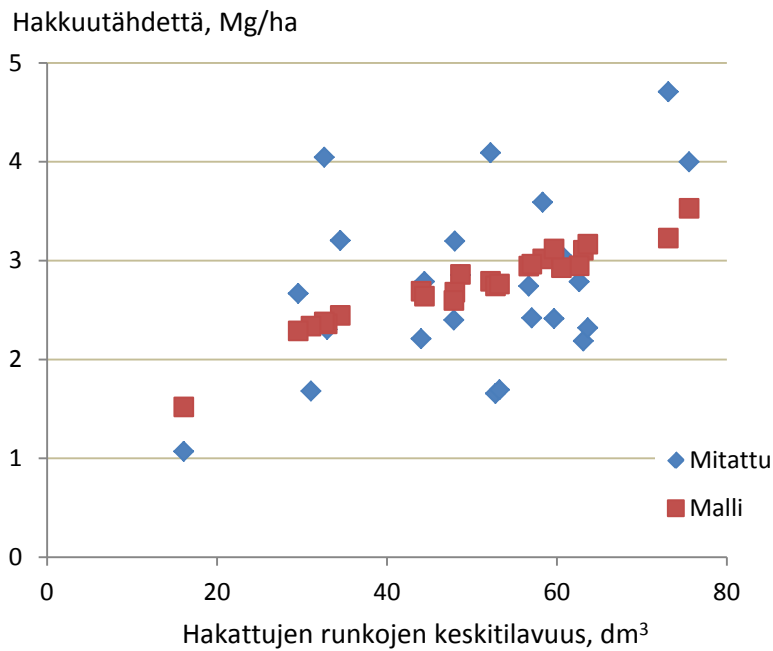
$B_{\text{Hakkuutähde}}$  = integroidussa korjuussa palstalle jäävä hakkuutähde (Mg/ha) ilman runkopuuta

$V$  = hakkuupoistuman tilavuus,  $m^3/ha$  (kuitupuu + energiapuu oksineen)

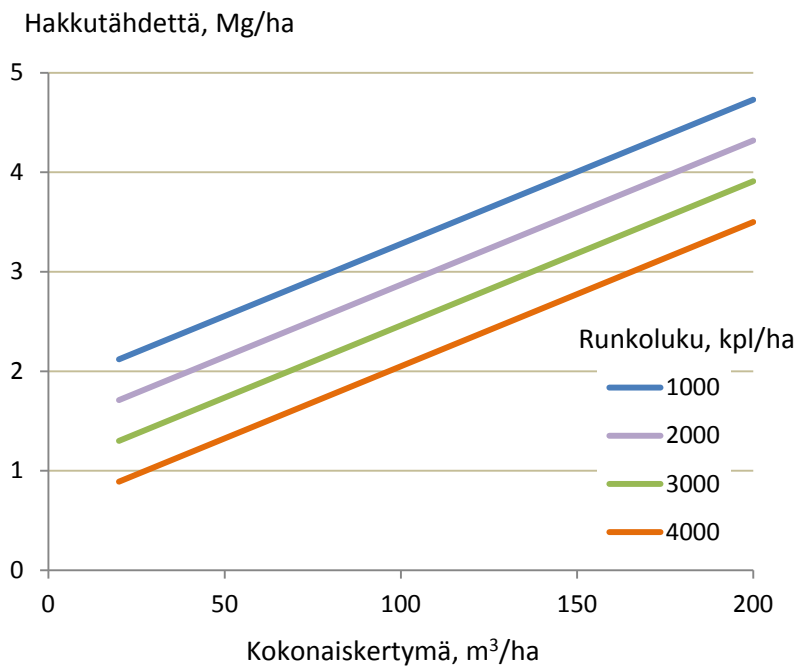
$N$  = hakkuupoistuman runkoluku,  $kpl/ha$

Mallin selityssaste,  $r^2 = 0,216$

Laaditun mallin mukaan palstalle jääneen hakkuutähteen määrä riippui ennen kaikkea hakkuussa poistettujen puiden keskikoosta (Kuva 22), mutta myös puuston tiheydellä oli vaikutusta (Kuva 23). Palstalle jäänyttä hukkarunkopuuta (tyvileikkoja tms.) oli keskimäärin 0,53 Mg/ha eli noin 1,05  $m^3/ha$ .



**Kuva 22.** Avohakkuukoealoilta (24 kpl) mitatut ja mallilla ennustetut hakkuutähteen kuivapainot ilman hukkarunkopuun osuutta (Mg = 1000 kg).



**Kuva 23.** Mallilla ennustetun hakkuutähteen (ilman hukkarunkopuuta) kuivapainon riippuvuus hieskoivikon avohakkuun kokonaiskertymästä (karsittu ainespuu + karsimaton energiapuu) ja runkoluvusta (Mg = 1000 kg).

## 4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimuksessa koottu aineisto oli kattava ja saadut tulokset ainutlaatuisia, koska vertailevaa tutkimusta pieniläpimittaisen puuston harvennus- ja avohakkuun tuottavuudesta ei ole aiemmin julkaistu. Lisäksi tutkimuksessa keskityttiin hieskoivuun, jonka hakkuun tuottavuudesta eri korjuolosuhteissa on hieskoivun yleisyydestä huolimatta varsin vähän julkaistuja tutkimustuloksia (Lilleberg 1994a, Peltola & Tantt 2008, Di Fulvio ym. 2011, Niemistö ym. 2012, Fernandes-Lacruz ym. 2013), koska hakkuututkimuksen pääpainopiste selvästi on ollut puhtaiden havupuukohteiden tai havupuuvaltaisten kohteiden puunkorjuussa (Kuitto ym. 1994, Lilleberg 1994ab, Lageson 1997, Eliasson 1998, Sirén 1998, Glöde 1999, Hännell 2000, Suadican & Fjeld 2001, Sirén & Tantt 2001, Ryyänen & Rönkkö 2001, Wester & Eliasson 2003, Kärhä ym. 2004, Gingras 2004, Kärhä 2006ab, Nurminen ym. 2006, Jirousek ym. 2007, Ovaskainen 2009, Spinelli & Maganotti 2010, Ovaskainen ym. 2011, Rieppo & Mutikainen 2011, Rieppo ym. 2011, Kärhä 2011, Lehtimäki & Nurmi 2011, Brunberg & Lundström 2012ab, Laitila & Väätäinen 2013ab, Sirén ym. 2013, Di Fulvio & Bergstöm 2013, Spinelli & Magagnotti 2013).

Lehtipuiden osalta tavaralajimenetelmän hakkuututkimukset ovat pääosin keskittyneet poppeliin tai eukalyptukseen tai kokopuuhakkuuseen paju- tai muilta energiapuuviljelmiltä (Hartsough & Cooper 1999, Spinelli ym. 2002, Puttock ym. 2009, Spinelli ym. 2009, Danilovic ym. 2011, Picchio ym. 2012, Suchomel ym. 2011, Di Fulvio 2012, Suchomel ym. 2012). Vastaavasti hakkuututkimukset aines- ja energiapuun integroidusta korjuusta on poikkeuksetta tehty männiköissä tai havusekametsissä (Jylhä & Laitila 2007, Kärhä ja Mutikainen 2008, Spinelli & Maganotti 2010, Nuutinen ym. 2011, Rieppo & Mutikainen 2011, Rieppo ym. 2011, Kärhä 2011, Lehtimäki & Nurmi 2011, Iwarson Wide 2011, Laitila & Väätäinen 2013ab, Sirén ym. 2013, Di Fulvio & Bergstöm 2013).

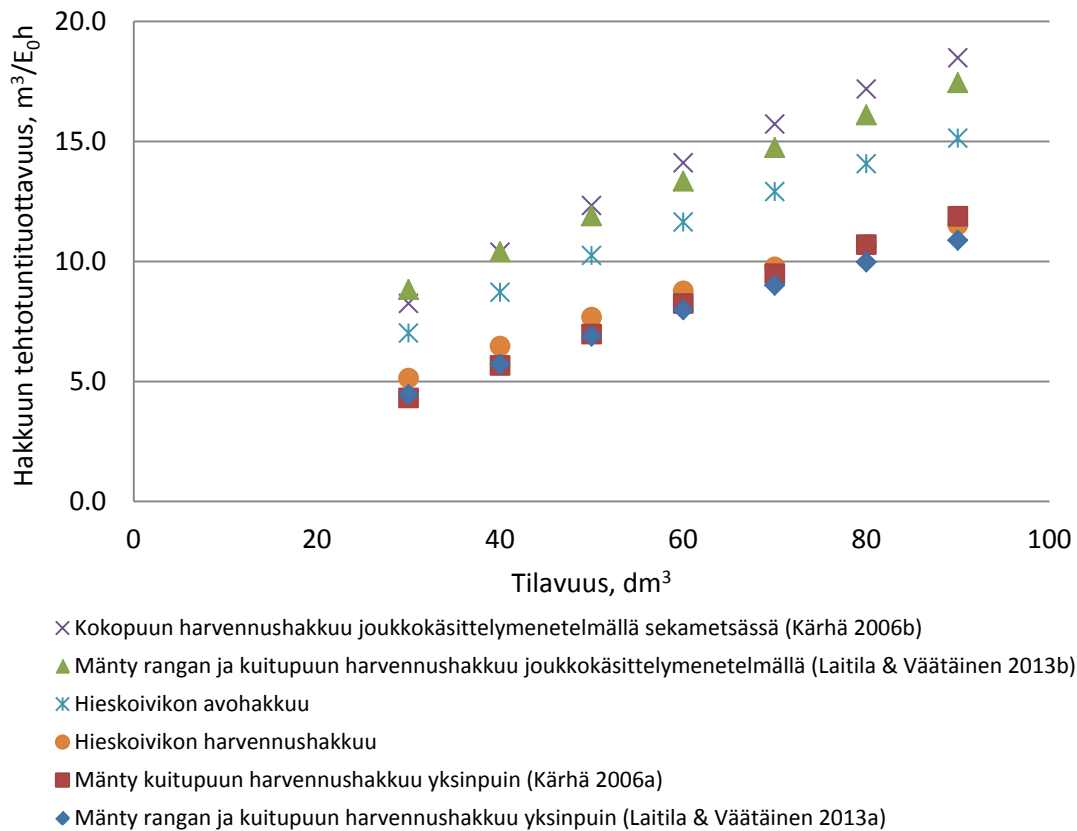
Avohakkuu paransi odotetusti työn tuottavuutta harvennushakkuuseen verrattuna, mutta joukkokäsittelyn vaikutus työn tuottavuuteen oli vähäinen alhaisen joukkokäsittelyprosentin takia molemmilla hakkuutavoilla. Hieskoivun rungon mutkaisuus tekee siitä joukkokäsittelyyn huonosti sopivan kun käytetään syöttävää ja karsivaa hakkuulaitteita, minkä vuoksi hieskoivu oli usein valmistettava puutavaraksi yksinpuinkäsittelynä. Tavanomainen ongelma joukkokäsittelyssä on puiden eriaikainen syöttö, eli karsittavat puut menevät eri tahtia kouran läpi, mikä aiheuttaa ei toivottua vaihtelua karsitun puutavaran pituudessa ja latvaläpimitoissa.

Eriaikainen syöttö ei aiheuttanut satunnaisia tapauksia lukuun ottamatta keskeytyksiä tässä tutkimuksessa, koska kuljettaja oli harjaantunut valikoimaan joukkohakkuuseen soveltuvat puut. Puiden haarat estävät mutkien ohella joukkokäsittelyhakkuun hyödyntämisen ja yksinpuinhakkuussa niiden käsittelyajan on havaittu olevan noin puolet suurempi kuin haarautumattomien runkojen kaato-, karsinta- ja kasausaika normaalisti on (Niemistö ym. 2012). Tässä tutkimuksessa hakkuuta hidastavien haarapuiden määrä rajoittui yksittäisiin runkoihin, koska hakattu puusto oli pääosin ensiharvennusikäistä ja siten varsin pienikokoista.

Hieskoivun avohakkuun osalta tulokset ovat yhteneväiset Niemistö ym. (2012) tulosten kanssa kun tuloksia verrataan hieskoivun avohakkuuseen kohteella, jossa ei ole säästettävää alikasvosta tai sitä ei tarvitse varoa. Niemistö ym. (2012) korjuututkimuksessa kuusen suojuspuina toimineet hieskoivut hakattiin keskikokoisella harvennusharvesterilla (John Deere 1070/745) ja yksinpuin menetelmällä. Niemistö ym. (2012) tutkimuksessa koeleimikot sijaitsivat Kärsämäellä, Pyhäjärvellä ja Kälviällä, eli maantieteellisesti varsin lähellä Vaalan Veneheitossa sijainneita hakkuutyömaita (50, 90 ja 160 km linnuntietä).

Tässä tutkimuksessa joukkokäsittelymenetelmällä hakattujen kourataakkojen osuus kourasykli- en kokonaismäärästä oli avohakkuu- ja harvennuskoealoilla keskimäärin 15–16 % ja ylimmilläänkin vain 32–50 %. Laitilan ja Väätäisen (2013b) ensiharvennusmännikössä tekemässä kuitupuun ja rangan yhdistelmäkorjuu tutkimuksessa hakkuulaitteessa oli keskimäärin 1,9 runkoa per kourasykli ja joukkokäsittelymenetelmällä (kourassa vähintään kaksi runkoa) hakattujen kourataakkojen osuus oli 29–92 %. Kourataakkojen keskimääräinen runkoluku em. tutkimuksessa oli alimmillaan 1,4 runkoa/taakka ja ylimmillään 3,3 runkoa/taakka (Laitila & Väätäinen 2013), kun taas hieskoivulla taakkakoko avohakkuulla oli korkeimmillaankin vain 1,6 runkoa/taakka ja harvennuksella 1,3 runkoa/taakka.

Lilleberg (1994a) havaitsi, että mutkaisen koivun osuuden lisäys vähentää joukkokäsittelyn käyttömahdollisuuksia Pohjois-Suomen päätehakkuilla, kun taas runkoluvun kasvu ja havupuiden osuuden lisäys puolestaan parantavat sitä. Ruotsissa tehdyissä aikatutkimuksissa joukkokäsittelyhakkuun on havaittu tehostavan työn tuottavuutta yksinpuinhakkuuseen verrattuna havupuuvaltaisilla ja pienipuustoisilla (120–220 dm<sup>3</sup> ilman kuorta) päätehakkuilla 4–16 % rungon järeyden pienetessä ja pitkäkestoisissa seurantalutkimuksissa havaittu tuottavuuden nousu on ollut keskimäärin 5 % samoissa korjuuolosuhteissa (Brunberg 2012). Sirénin ym. (2013) ja Brunbergin (2012) mukaan syitä joukkokäsittelyhakkuun vähäiseen hyödyntämiseen ovat mm. hakkuupoistuman jakautuminen usean puulajin kesken, kuusialikasvos sekä joissakin tapauksissa kuljettajien vähäinen kokemus työtavasta.



**Kuva 24.** Vertailu aiempiin hakkuututkimuksiin puun/rungon tilavuuden mukaan kun hakkuupoistuma on 1500 runkoa hehtaarilta.

Kuvassa 24 verrattiin saatuja tuloksia sekakokopuun joukkokäsittelyhakuuseen harvennuksella (Kärhä 2006b), mänty kuitupuun yksipuinhakuuseen harvennuksella (Kärhä 2006a) sekä mänty kuitupuun ja rangan yhdistelmäkorjuuseen harvennuksella joko yksipuinhakuuna tai joukkokäsittelymenetelmällä (Laitila & Väättäinen 2013ab). Kuvan 24 vertailulaskelmassa hakkuupoistuma oli 1500 runkoa hehtaarilta. Tulosten perusteella hieskoivun harvennushakkuu oli samalla tasolla kuin männyn hakkuu yksipuinhakuuna tai yhdistelmämenetelmällä kuitupuuksi ja rangaksi (Kuva 24). Harvennuspuun joukkokäsittelyhakuuseen verrattuna hieskoivun hakkuun tuottavuus jäi alemmaksi sekä avohakkuussa että harvennushakkuussa. Hakkuumallianalyysin perusteella pääsy kuvassa 24 näkyvään tuottavuuseroon on joukkokäsittelymenetelmällä hakattujen kourataakkojen selvästi pienempi osuus hieskoivun hakkuussa kuin sekakokopuun hakkuussa tai mänty kuitupuun ja rangan yhdistelmäkorjuussa joukkokäsittelymenetelmällä. Hakkuutavasta ja puulajista riippumatta suurin vaikutus hakkuun tuottavuuteen on hakkuupoistuman järeydellä (Kuva 24).

Aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa hieskoivikoiden avohakkuualalle jäi pääosin oksista koostuvaa hakkuutähdettä 1–5 tonnia/ha. Tämä vastasi 4–10 % koealapuustojen maanpäällisestä lehdeettömästä biomassasta ja arviolta 20–50 % niiden oksabiomassasta. Niemistön (2013) mukaan oksabiomassaa on harventamattomassa tai riittävän pitkään harvennuksen jälkeen häiriöttä kehittyneessä hieskoivikossa keskimäärin 10 tonnia/ha. Em. lisäksi palstalle jäi runkopuuta keskimäärin 1,1 m<sup>3</sup>/ha, mikä koostui joko kourataakkojen ulkopuolelle jääneistä tai taakasta tai kuormasta pudonneista rungonosista.

Avohakkuussa palstalle jääneen hakkuutähteen määrä lisääntyi hakkuukertymän lisääntyessä. Runkoluvun vaikutus oli päinvastainen eli samalla kokonaiskertymällä runkoluvun lisääntyminen vähensi hakkuutähteen määrää. Syynä on runkojen keskikoon pienentyminen, jolloin ainespuuksi karsittavien runkojen määrä vähenee. Toinen syy on latvusten supistuminen tiheissä puustoissa, joka osaltaan pienentää karsittavien oksien määrää ja kokoa.

Kaikkiaan hieskoivikon hakkuussa palstalle jäi vähemmän biomassaa kuin vastaavanlaisessa puunkorjuussa havupuuvaltaisissa metsissä. Esimerkiksi mäntyvaltaisten rämeiden harvennuksessa on hakkuutähdettä jäänyt 7.3 tonnia/ha kokonaiskertymän ollessa noin 70 m<sup>3</sup>/ha (Siren ym. 2013) ja vastaavassa hakkuussa neulasten osuus vähennettynä noin 6 tonnia/ha (Ilvesniemi ym. 2012). Tässä tutkimuksessa vastaavalla kertymällä hieskoivikon avohakkuussa hakkuutähdettä jäi palstalle noin 3 tonnia/ha eli 50 % siitä, mitä männiköissä ilman neulasia. Tulos johtuu koivun luontaisesta karsitumisesta sekä elävien oksien sitkeydestä ja pienestä oksakulmasta, minkä vuoksi oksia katkeilee puunkorjuussa vähemmän kuin havupuilla. Talteensaanto parani myös siksi, että latvukset sekä hakattiin että kuormattiin lumen päältä ilman, että niitä olisi kuivatettu palstalla ennen metsäkuljetusta, kuten normaali käytäntö on. Latvusmassan suhteellisella osuudella puun kokonaisbiomassasta on myös vaikutus palstalle jäävän hakkuutähteen määrään ja kuusen hakkuussa hakkuutähteitä syntyy selvästi enemmän kuin männyllä tai koi-vulla (Nurmi 2007).

Hieskoivulla latvapuun haaraista ja oksaista, mikä puolsi hieskoivulla energiaosittien korjuuta kokopuuna. Lisäksi kuitupuun pienin sallittu latvaläpimitta oli 5 cm, eli energiaosittien kertymä jäi varsin pieneksi, vaikka työmaat olivat pääasiassa ensiharvennusikäisiä metsiä, joissa puut kapenevat latvastaan hitaasti ja poistettavien puiden runkoluku on suuri. Palstalle jäävän hakkuutähteen määrää voi tarvittaessa lisätä energiaosittien karsinnalla tai osittaisella karsinnalla (Heikkilä ym. 2005, Rieppo ym. 2010). Rankana korjuu alentaa hakkuun tuottavuutta ja kertymää karsintahävikin verran mutta rankana korjuun etuja etenkin havupuilla ovat suurempi kuormakoko metsäkuljetuksessa sekä parempi tuottavuus haketuksessa ja kaukokuljetuksessa

(Heikkilä ym. 2005, Laitila & Väätäinen 2011, Laitila 2012). Rankana korjuussa on myös saatavissa kuljetus- ja varastointilogistisia hyötyjä kun puut voidaan kuljettaa vakiorakenteisella puutavara-autolla terminaaliin tai käyttöpaikalle hakettavaksi (Heikkilä ym. 2005, Laitila & Väätäinen 2011, Laitila 2012). Lisäksi lämpö- ja voimalaistokattiloille haitallisen kloorin ja alkalien määrä on pienempi karsitusta puusta tehdyssä hakkeessa (Nurmi & Hillebrand 2007). Katkontapituus vaikuttaa karsinnan ohella metsäkuljetuksen kuormakokoon, eli sekä kuitupuu että energiaosite tulisi korjata mahdollisimman pitkänä.

Tutkimuksessa käytettiin vain yhtä kokenutta ja taitavaa kuljettajaa, mikä rajoittaa tulosten suoraan yleistämistä käytäntöön. Tulokset ovat johdonmukaisia ja luovat vankan pohjan kun tehdään kannattavuuslaskelmia hieskoivun eri kasvatusvaihtoehtojen välillä. Tuottavuustuloksia tarkasteltaessa on myös pidettävä mielessä, että tuottavuudet ovat tehotuntituottavuuksia, eli hakkuukoneen tuottavuus tauottomassa ja keskeytymättömässä työssä. Tehotunti on käyttökelpoinen mittayksikkö kun verrataan eri työtapojen välisiä eroja, mutta puunkorjuussa tulee vääjäämättä kuljettajasta, koneesta ja korjuuolosuhteista johtuvia keskeytyksiä, jotka alentavat tuottavuutta. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu, että seurantatutkimukseen perustuvat tuottavuuskäyrät ovat selvästi alemmalla tasolla kuin aikatutkimuksien perusteella lasketut käyttötuntituottavuudet (Mäki 1999, Rynänen ja Rönkkö 2001, Sirén ja Aaltio 2003). Syynä tähän on mm. se, että lyhyinä koealarupeamina toteutettavat aikatutkimukset eivät täysin vastaa käytännön työtilanteita. Sen vuoksi pitkäkestoinen seurantatutkimus antaa luotettavamman kuvan käytännössä vallitsevasta tuottavuudesta ja kuljettajien välisistä eroista (Sirén 1998, Rynänen ja Rönkkö 2001, Kariniemi 2003, Väätäinen ym. 2005, Sirén ja Aaltio 2003).

Saadut tulokset ovat erittäin lupaavia ja puoltavat tutkitun hakkuutavan laajempaa soveltamista käytännön korjuutoimintaa. Korjuulogiikan kannalta olisi mielenkiintoista selvittää, onko avohakkuulla mahdollista muuttaa osa talvikorjuuleimikoista kesäkorjuuleimikoiksi, sillä avohakkuu antaa harvennuksia enemmän vapausasteita metsäkuljetuksen ajoreittien sijoitteluun palstalle samoin kuin ajokertojen säätelyyn ajouralla. Heikkilän (2007) mukaan suometsien nykyistä tehokkaampi hyödyntäminen edellyttää, että korjuukauden pidentämiseen pyritään määrätietoisesti, sillä korjuun kausivaihtelu johtaa korkeisiin kustannuksiin korjuussa ja puutavaran varastoinnissa ja hankaloittaa ammattitaitoisen työvoiman saantia alalle. Väätäisen ym. (2010) simulointitutkimuksen perusteella todettiin, että ympärivuotinen turvemaiden puunkorjuu paransi kuljettajien työllistymistä ja koneiden käyttöasteita sekä avasi mahdollisuuden lisätä vuotuista korjuumäärää samalla korjuukalustomäärällä toimittaessa. Metsätehon teettämän asiantuntijakyselyn mukaan puunkorjuun tehostaminen nuorissa metsissä edellyttää parempia korjuuolosuhteita sekä korjuun rationalisointia (Oikari ym. 2010). Korjuun tehostamisella pyritään yksikkökustannusten alentamiseen, mikä käytännössä tarkoittaa puun korjaamista samassa aikayksikössä enemmän tai pienemmillä käyttötuntikustannuksilla.

Tutkimuksessa nousi esille tarve parantaa nykyisten hakkuulaitteiden soveltuvuutta koivun ja muiden mutkaisten puiden hakkuuseen ja joukkokäsittelyyn, koska hakkuussa havaitun tuottavuushyppäyksen taustalla oli lähinnä avohakkuun suomat harvennusta paremmat korjuuolosuhteet: 1) puukohtainen siirtymisaika pieneni kun samasta työpisteestä pystyi hakkaamaan selvästi enemmän puita kuin harvennuksella, 2) puiden poisto tapahtui systemaattisesti, 3) jäävä puusto ei hidastanut puiden karsintaa, katkontaa eikä kasausta. Metsäkuljetuksessa tuottavuus puolestaan paranee harvennusta suuremman hehtaarikertymän ja parempien työskentelyolosuhteiden kautta.

## Lähteet

- Atkinson, C.J. 1984. Quantum flux density as a factor controlling the rate of growth, carbohydrate partitioning and wood structure of *Betula pubescens* seedlings. *Annals of Botany* 54: 397–411.
- Bergroth, J., Ihalainen, A. & Heikkilä, J. 2008. Ojitettujen turvemaiden taloudellinen ensiharvennuspotentiaali. *Metsätehon katsaus* 32. 4 s.
- Björheden, R. & Fröding, A. 1986. Ny rutin för gallringsuppföljning. Julkaisussa: Tänk till gallringsfrågan. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik, Uppsatser och Resultat 52: 71–76.
- Brunberg, T. 2012. Flerträdshantering i slutavverkning ökar prestationen. Resultat från Skogforsk. Nr. 13/2012. 4 s.
- Brunberg, T. & Lundström, H. 2012a. Studie av flerträdshantering i slutavverkning med John Deere 1270E hos SCA Skog hösten 2012. Arbetsrapport Från Skogforsk nr. 774. 14 s.
- Brunberg, T. & Lundström, H. 2012b. Studie av flerträdshantering i slutavverkning med John Deere 1170E hos Holmen Skog vintern 2012. Arbetsrapport Från Skogforsk nr. 765. 11 s.
- Danilovic, M., Tomasevic, I. & Gacic, D. 2011. Efficiency of John Deere 1470D ECOIII Harvester in Poplar Plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 32(1): 533–548.
- Di Fulvio, F. & Bergström, D. 2013. Analyses of a single-machine system for harvesting pulpwood and/or energy-wood in early thinnings. *International Journal of Forest Engineering* (24)1: 2–15.
- Di Fulvio, F., Kroon, A., Bergström, D. & Nordfjell, T. 2011. Comparison of energywood and pulpwood thinning systems in young birch stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* (26)4: 339–349.
- Di Fulvio, F., Bergström, D., Kons, K. & Nordfjell, T. 2012. Productivity and Profitability of Forest Machines in the Harvesting of Normal and Overgrown Willow Plantations. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(1): 25–37.
- Eliasson, L. 1998. Analyses of single-grip harvester productivity Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Operational Efficiency. Umeå. *Silvestria* 80. 24 s. + 4 artikkelia.
- Ferm, A. 1990. Coppicing, aboveground woody biomass production and nutritional aspects of birch with specific reference to *Betula pubescens*. *Finnish For. Res. Inst. Res. Rap.* 348. 35 s.
- Fernandez-Lacruz R., Di Fulvio F., Bergström D. (2013). Productivity and profitability of harvesting power line corridors for bioenergy. *Silva Fennica* vol. 47 no. 1 article id. 904. 23 p.
- Gingras, J-F. 2004. Early Studies of Multi-Tree Handling in Eastern Canada. *International Journal of Forest Engineering* 15(2): 18–22



- Glöde, D. 1999. Single- and double-grip harvesters – Productive measurements in final cutting of shelterwood. *Journal of Forest Engineering* 10(2): 63–74.
- Hartsough, B.R. & Cooper, D.J. 1999. Cut-to-length harvesting of short rotation Eucalyptus. *Forest Products Journal*. 49 (10): 69–75
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 10. 56 s.
- Hånell, B., Nordfjell, T. & Eliasson, L. 2000. Productivity and costs in shelterwood harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 561–569.
- Iivesniemi, H., Hartman, M., Hytönen, J., Laurén, A., Kaila, A., Kantola, M., Kiikkilä, O., Kremsa, J., Kubin, E., Lindgren, M., Lindroos, A.-J., Moilanen, M., Murto, T., Nieminen, M., Nieminen, T.M., Penttilä, T., Piispanen, J., Saarsalmi, A., Smolander, A., Tamminen, P. & Ukonmaanaho, L. 2012. Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin ja vesistöihin. Julkaisussa: Asikainen, A., Iivesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.). Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240: 53–82.
- Iwarson Wide, M. 2011. Var går gränsen ? Massaved och/eller energiuttag i klen gallring. Resultat från Skogforsk 9/2011. 4 s.
- Jirousek, R., Klvac, R. & Skoupy, A. 2007. Productivity and cost of the mechanized cut-to-length wood harvesting system in clear-felling operations. *Journal of Forest Science* (53)10: 476-482.
- Jylhä, P. & Laitila, J. 2007. Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Silva Fennica* 41(4): 763–779.
- Kariniemi, A. 2006. Kuljettajakeskeinen hakkuukonetyön malli – työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 38. 127 s.
- Korjuujälki harvennushakkuussa -opas. 2003. Metsäteho Oy. 33 s.
- Kuitto, P.J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. *Metsätehon tiedotus* 410. 38 s.
- Kärhä, K. 2006a. Effect of undergrowth on the harvesting of first thinning wood. *Forestry Studies* 45:101–117.
- Kärhä, K. 2006b. Whole-tree harvesting in young stands in Finland. *Forestry Studies* 45: 118–134.
- Kärhä, K. 2011. Integrated harvesting of energy wood and pulpwood in first thinnings using the twopile cutting method. *Biomass and Bioenergy* 35 (8): 3397–3403.
- Kärhä, K. & Mutikainen, A. 2008. Moipu 400ES eniharvennuspuun integroidussa hakkuussa. TTS tutkimuksen tiedote. Luonnonvara-ala: metsä 10/2008 (726) 6 s.

- Kärhä, K., Rönkkö, E. & Gumse, S.-I. 2004. Productivity and cutting costs of thinning harvesters. *International Journal of Forest Engineering* 15(2): 43–56.
- Lageson, H. 1997. Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. *Journal of Forest Engineering* 8(2): 7–14.
- Laitila, J. 2012. Methodology for choice of harvesting system for energy wood from early thinning. *Dissertationes Forestales* 143. 68 s.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011: 107–126.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2013a. Hakkuutyön tuottavuus metsävarustellulla turvetuotantotraktorilla karsitun aines- ja energiapuun korjuussa. *Suo - Mires and Peat* 64(2-3): 97–112.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2013b. The cutting productivity of the excavator-based harvester in integrated harvesting of pulpwood and energy wood. *Baltic Forestry* (19)2.
- Lehtimäki, J. & Nurmi, J. 2011. Energy wood harvesting productivity of three harvesting methods in first thinning of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Biomass and Bioenergy* 35 (8): 3383–3388
- Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2010. Energiapuun mittaus (27.9.2010). Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsäntutkimuslaitos. 31 s.
- Lilleberg, R. 1994a. Joukkokäsittelyharvesteri Pohjois-Suomen päätehakuissa. *Metsäteho katsaus* 2/1994. 6 s.
- Lilleberg, R. 1994b. Joukkokäsittelyharvesteri FMG 990/756 H ensiharvennuskönnössä. *Metsäteho katsaus* 8/1994. 6 s.
- Maa- ja metsätalousministeriön asetus kuormainvaa’an käytöstä puutavaran mittauksessa ja erien erillään pidosta annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen muuttamisesta. 2010. (Dnro 666/14/2010, Nro 8/10). 8 s.
- Mäki, J.-P. 1999. Runko-ohjattavat erikoistraktorit harvennushakuissa. *Työtehoseuran monisteita* 4/1999 (74): 78 s.
- Niemistö, P. 1991. Hieskoivikoiden kasvatusitiheys ja harvennuskönnöt Pohjois-Suomen turveilla. Summary: Growing density and thinning models for *Betula pubescens* stands on peatlands in northern Finland. *Folia Forestalia* 782. 36 s.
- Niemistö, P. 2008. Koivun kasvatus sekametsissä. Julkaisussa: Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Velling, P., Heräjärvi, H. & Verkasalo, E. (toim.). *Koivun kasvatus ja käyttö*. Metla & Metsäkustannus, s. 137–150.
- Niemistö P. 2013. Effect of growing density on biomass and stem volume growth of downy birch stands on peatland in Western and Northern Finland. *Silva Fennica* vol. 47 no. 4 article id. 1002. 24 s.

- Niemistö, P. & Poutiainen, E. 2004. Hieskoivikon käsittelyn vaikutus kuusialikasvoksen kehitykseen Keski- ja Pohjois-Pohjanmaan viljavilla ojitusalueilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 441–459.
- Niemistö, P. & Korhonen, K.T. 2008. Koivuvarat ja kasvu. Julkaisussa: Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Velling, P., Heräjärvi, H. & Verkasalo, E. (toim.). *Koivun kasvatusta ja käyttöä*. Metla & Metsäkustannus, s. 175–181.
- Niemistö, P., Korpunen, H., Laurén, A., Salomäki, M. & Uusitalo, J. 2012. Impact and productivity of harvesting while retaining young understorey spruces in final cutting of downy birch. *Silva Fennica* 46(1): 81–97.
- Nurmi, J. 2007. Recovery of logging residues for energy from spruce (*Picea abies*) dominated stands. *Biomass Bioenergy* 31(6): 375–380.
- Nurmi, J. & Hillebrand K. 2007. The characteristics of whole-tree fuel stock from silvicultural cleanings and thinnings. *Biomass and Bioenergy* 31(6): 381–392.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption and analysis of the mechanized cut-to-length system. *Silva Fennica* 40(2): 335–363.
- Nuutinen, Y., Väättäin, K., Heinonen, J., Asikainen, A. & Röser, D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. *Silva Fennica* 42(1): 63–72.
- Nuutinen, Y., Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P. & Keskinen, S. 2011. Productivity of whole-tree bundler in energy wood and pulpwood harvesting from early thinnings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26: 329–338.
- Oikari, M., Kärhä, K., Palander, T., Pajuoja, H. & Ovaskainen, H., 2010. Analyzing the views of wood harvesting professionals related to the approaches for increasing the costefficiency of wood harvesting from young stands. *Silva Fennica* 44 (3): 481–495.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales* 79. 62 s.
- Ovaskainen, H., Palander, T., Tikkanen, L., Hirvonen, H. and Ronkainen, P. 2011. Productivity of different working techniques in thinning and clear cutting in a harvester simulator. *Baltic Forestry* 17(2): 288–298.
- Peltola, M. & Tantt, V. 2008. Kuusen taimikon verhopuuston korjuu energiapuuksi. TTS tutkimuksen tiedote. *Luonnonvara-ala: metsä* 4/2008 (720) 6 s.
- Picchio, R., Sirna, A., Sperandio, G. Spina, R. & Verani, S. 2012. Mechanized Harvesting of Eucalypt Coppice for Biomass Production Using High Mechanization Level. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(1): 15–24.
- Puttock, D., Spinelli, R. & Hartsough, B.R. 2005 Operational Trials of Cut-To-Length Harvesting of Poplar in a Mixed Wood Stand. *International Journal of Forest Engineering* 16(1): 39–49

- Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2011. Naarva EF28 integroidussa ja energiapuun hakkuussa. TTS:n tiedote: metsätyö, -energia ja yrittäjyys 8/2011 (753). 6 s.
- Rieppo, K., Mutikainen, A. & Jouhioaho, A. 2011. Energia- ja ainespuun korjuu nuorista metsistä. TTS:n julkaisuja 411. 102 s.
- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 s.
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Doctoral thesis. Finnish Forest Research Institute. Research papers 694. 179 s.
- Sirén, M. & Tantt, V. 2001. Pienet hakkuukoneet ja korjuri rämemänniköiden talvikorjuussa. Metsätieteiden aikakauskirja 4/2001: 599–614.
- Sirén, M. & Aaltio, H. 2003. Productivity and costs of thinning harvesters and harvester-forwarders. *International Journal of Forest Engineering* 14(1): 39–48.
- Sirén, M., Hytönen, J., Ala-Ilomäki, J., Neuvonen, T., Takalo, T., Salo, E., Aaltio, H. & Lehtonen, M. 2013. Integroitu aines- ja energiapuun korjuu turvemaalla sulan aikana – korjuujälki ja ravinnetalous. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. 24 s.
- Spinelli, R. & Magagnotti, N. 2010. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25(1): 69–77
- Spinelli, R. & Magagnotti, N. 2013. The effect of harvest tree distribution on harvesting productivity in selection cuts. *Scandinavian Journal of Forest Research* (28)7: 701–709.
- Spinelli, R., Owende, P. & Ward, S. 2002. Productivity and cost of CTL harvesting of *Eucalyptus globulus* stands using excavator-based harvesters. *Forest Products Journal* 52(1): 67–77.
- Spinelli, R., Magagnotti, N. & Nati, C. 2009. Options for the Mechanized Processing of Hardwood Trees in Mediterranean Forests. *International Journal of Forest Engineering* 20(1): 39–44
- Suadicani, K. & Fjeld, D. 2001. Single-tree and Group Selection in Montane Norway Spruce Stands: Factors Influencing Operational Efficiency. *Scandinavian Journal of Forest Research* Volume 16(1): 79–87
- Suchomel, C., Becker, G. & Pyttel, P. 2011. Fully mechanized harvesting in aged oak coppice stands. *Forest Products Journal*. 61(4): 290–296
- Suchomel, C., Spinelli, R. & Magagnotti, N. 2012. Productivity of Processing Hardwood from Coppice Forests. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(1): 39–47.
- Väätäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. ja Ala-Fossi, A. 2005. Hakkuukonekuljettajanhiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. *Finnish Forest Research Institute Research Papers* 937. 100 s.

Väätäinen, K., Lamminen, S., Sirén, M., Ala-Ilomäki, J. & Asikainen, A. 2010. Ympärivuotisen puunkorjuun kustannusvaikutukset ojitetuilla turvemailla – korjuuyrittäjätason simulointitutkimus. Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 184. 57 s.

Wester, F. & Eliasson, L. 2003. Productivity in final felling and thinning for a combined harvester-forwarder (harwarder). *International Journal of Forest Engineering* 14(2): 45–51.