

Fixteri FX15a –kokopuupaalaimen tuottavuus ja työprosessit nuorten mäntyvaltaisten metsien energiapuun korjuussa

Yrjö Nuutinen ja Rolf Björheden

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

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
faksi 029 532 2103
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18
01301 Vantaa
puh. 029 532 2111
faksi 029 532 2103
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Nuutinen, Yrjö & Björheden, Rolf			
Nimeke Fixteri FX15a –kokopuupaalaimen tuottavuus ja työprosessit nuorten mäntyvaltaisten metsien energiapuun korjuussa			
Vuosi 2014	Sivumäärä 21	ISBN 978-951-40-2458-0 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Itä-Suomen alueyksikkö / ForestEnergy 2020 / 3564 ForestEnergy 2020			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, 24.01.2014			
Tiivistelmä <p>Fixteri FX15a -kokopuupaalaimen tuottavuustutkimus toteutettiin maaliskuussa 2013 Jyväskylän ympäristössä kolmella puustoltaan erilaisella mäntyvaltaisella kuviolla. Kaksi kuvioista oli energiapuukorjuukohteita. Ensimmäisellä energiapuukuviolla oli tiheä hakkuuta haittaava alikasvos, jossa poistettavien kokopuiden keskikoko oli 27 dm³. Toiselta energiapuukuviolta alikasvos oli raivattu kokonaan poistettavien kokopuiden keskikoon ollessa 44 dm³. Kolmas testihakkuukuvioli oli normaali ensiharvennuskohde ilman alikasvosta ja siellä vastaavasti poistuman keskikoko oli 84 dm³. Aikatutkimuksen testihakkuut toteutettiin perinteisellä alaharvennuksella ajouran sijaitessa aikatutkimuskoealojen keskellä. Testihakkuussa kokopuurungot paalattiin energiapuupaaleiksi. Aikatutkimuskoealoja oli kaikkiaan 9, kolme kullakin testikuviolla, joista yhteensä kertyi 171 paalia.</p> <p>Tutkitun koneyksikön muodosti Nisula 280E+ joukkokäsittelyvä hakkuulaite, Logman 811FC alustakone sekä Fixteri FX15a paalain. Fixteri paalain asennetaan alustakoneen kuormatilan päälle. Paalain ottaa sähkö- ja hydraulikkajärjestelmän käyttövoiman alustakoneesta ja sen toimintoja ohjataan alustakoneen ohjaamon käsikahvoista. Ohjaamosta saadaan informaatio paalaimen toiminnasta ja tuotantomäärästä. Koko koneyksikön kokonaispituus on 890 cm, korkeus 390 cm, leveys 290 ja paino noin 23 500 kg. Paalaimen paino on noin 8 500 kg. Fixteri-korjuussa puiden hakkuu tehdään joukkokäsittelyvällä hakkuupäällä, joka syöttää katkaistut puut paalaimen. Automatisoitu paalain katkoo ja niputtaa kokopuurungot 2,5–2,7 m pituisiksi noin 0,5 m³ kokoisiksi paaleiksi. Paalain mittaa ja rekisteröi automaattisesti koneen tietokoneelle valmiin paalin tuorepainon ja punnitusajankohdan.</p> <p>Energiapuukuviolla, jossa oli tiheä alikasvos, paalaimen tuottavuus oli keskimäärin 9,7 m³ tehotunnissa, kun poistettavien kokopuiden keskikoko oli 27 dm³. Energiapuukuviolla ilman alikasvosta tehotuntuottavuus kohosi 11,9 m³:iin poistettavien kokopuiden keskikoon kasvaessa 44 dm³:iin. Ainespuukuviolla paalain ylsi 13,8 m³ tuotokseen 84 dm³ kokoisilla kokopuilla. Tutkitun Fixteri FX15a paalaimen tehotuntuottavuus oli poistettavien kokopuiden koosta ja määrästä riippuen 2,1–2,3 kertaa korkeampi kuin edellisen Fixteri II-paalaimen. Kokopuunpaalauksen huomattavaa paranemista selittää Fixterin uudistetun hakkuulaitteen tehokkaampi puiden joukkokäsittelyvä hakkuu sekä entistä suurempien puunippujen nopeampi syöttö paalaimen. Nisula 280E+ joukkokäsittelyvällä hakkuulaiteella puiden määrä taakkaa kohden oli myös suurempi kuin edellisessä tutkimuksessa käytetyllä hakkuupäällä.</p> <p>Tutkimuksen testihakkuissa uusi joukkokäsittelyvä hakkuupää soveltui parhaiten energiapuukuivioiden korjuuseen, joissa poistettujen kokopuiden keskikoko oli 27–44 dm³. Ainespuukuviolla harvennettavat puut (keskikoko 84 dm³) osoittautuivat liian suuriksi tehokkaaseen joukkokäsittelyyn. Siellä joukkokäsittelyaste, jolloin taakassa oli kaksi tai useampia puita, oli vain 68 % kun energiapuukuviolla vastaava osuus oli yli 90 %. Ainespuukuviolla kului yli puolet enemmän aikaa kaadettujen puiden järjestelyyn verrattuna energiapuukuvioiden.</p> <p>Hakkuupään/nosturin ja paalaimen tekninen tuottavuusanalyysi osoitti, että puiden hakkuu rajoittaa koneyksikön tuottavuutta. Kun hakkuun ja paalauksen tuotantokapasiteettien tasoa verrattiin, havaittiin, että hakkuun tuottavuus oli paalauksen tuottavuudesta 11–57 % prosessoitavien puiden kantoläpimitan ollessa välillä oli 5–17 cm. Tämän vuoksi Fixteri-koneyksikön tuottavuuden parantamiseksi tulisi kehitystyö kohdistaa hakkuupään joukkokäsittelyominaisuuksien ja paalaimen syötön parantamiseen.</p>			
Asiasanat Paalaus, Fixteri, energiapuun, ainespuu, tuottavuus			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2014/mwp281.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Yrjö Nuutinen, yrjo.nuutinen@metla.fi; Rolf Björheden, rolf.bjorheden@skogforsk.se			
Muita tietoja taitto: Anne Siika/Metla			

Sisällys

1 Johdanto	5
1.1 Kokopuun paalauksen kehitys	5
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus.....	6
2 Aineisto ja menetelmä	6
2.1 Tutkittava koneyksikkö ja sen työmenetelmä	6
2.2 Hakkuun aikatutkimus (osatutkimus 1).....	7
2.3 Tekninen tuottavuusanalyysi (osatutkimus 2).....	10
3 Tulokset	12
3.1 Tehoajanmenekin rakenne (osatutkimus 1).....	12
3.2 Tuottavuus (osatutkimus 1).....	13
3.3 Tekninen tuottavuusanalyysi (osatutkimus 2).....	15
4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	17
Lähteet	20

1 Johdanto

1.1 Kokopuun paalauksen kehitys

Noin puolet Suomen metsämaan pinta-alasta on taimikoita ja nuoria kasvatusmetsiä (Peltola ja Ihalainen 2010). Tällä hetkellä Suomen nuorista metsistä korjattavan aines- ja energiapuun määrä on pienempi kuin niiden metsähoidollinen tarve edellyttäisi (Kansallinen metsäohjelma... 1999, Juntunen ja Herrala-Ylinen 2008, 2009). Syynä tähän on puunkorjuun alhainen tuottavuus ja korkeat kustannukset, mikä johtuu pääasiassa pienestä rungon koosta ja hehtaarikohtaisesta kertymästä. Usein nuorissa leimikoissa on myös tiheä alikasvos, joka hidastaa hakkuuta (Kärhä ym. 2001, Oikari ym. 2008). Ensiharvennuspuulla hakkuun osuus korjuukustannuksista on yli puolet (Kärhä ym. 2009). Pienpuuhakkeen tuotantokustannuksista lähes puolet muodostuu hakkuussa ja metsäkuljetuksessa (Kärhä 2006, Laitila 2008). Tulevaisuudessa nuorten metsien hoitohakkuita olisi tehostettava, sillä harvennusten laiminlyönti tai myöhästyminen johtaa puuston arvokasvun laskuun ja entistä korkeampiin kustannuksiin myöhemmissä hakkuissa. Valtakunnan metsien inventointilaskelmiin perustuen Korhonen ym. (2007) ovat esittäneet, että ensiharvennustavoitteen Suomessa tulisi olla 300 000 hehtaaria vuodessa seuraavien viiden vuoden aikana.

Pieniläpimittaisen puun korjuun tehostamista on Pohjoismaissa kokeiltu vuosien varrella useilla teknisillä ratkaisuilla (Bergstöm 2009, Belbo 2011, Laitila 2012). Menestynein menetelmä on pieniläpimittaisen harvennuspuun hakkuu joukkokäsittelytekniikkaan perustuvilla hakkuupäillä sekä puiden kuljetus kuormatraktorilla tienvarsivarastolle (Iwarsson Wide 2010). Puupolttoaineen kasvava kysyntä on mahdollistanut hyödyntää kustannustehokkaasti myös niitä puuraaka-aineen jakeita, joita ei tarvita perinteisen metsäteollisuuden valmistusprosesseihin; esimerkiksi hakkuutähteitä, kantoja ja pieniläpimittaista kokopuuta (Richardson et al. 2000). Fixteri Oy:n kehittämä Fixteri -paalain pieniläpimittaisen puuston korjuuseen on asennettu alustakoneen kuormatilan päälle. Fixteri -korjuussa puiden hakkuu tehdään joukkokäsittelyllä hakkuupäällä, joka syöttää katkaistut puut paalaimen. Automatisoitu paalain katkoo ja niputtaa kokopuurungot 2,5 – 2,7 m pituisiksi noin 0,5 m³ kokoisiksi paaleiksi. Korjuumenetelmässä hakkuukohteelta paalataan erikseen sekä ainespuumittaiset rungot että ainespuuksi kelpaamattomat energiapuurungot.

Kokopuupaalien metsäkuljetuksessa ja kaukokuljetuksessa ei vaadita erikoiskalustoa vaan valmiit paalit voidaan kuljettaa kuormatraktorilla tienvarsivarastolle ja sieltä perinteisillä tukkirekoilla käyttöpaikalle. Metsäkuljetuksessa kokopuiden paalaus suurentaa taakkakokoa kuormaus- ja purkutyössä sekä kasvattaa kuormakoko metsäkuljetuksessa. Kärhän (2009) mukaan kokopuiden metsäkuljetuksen kustannus on noin kaksi kertaa suurempi kuin kokopuupaalien ja ensiharvennuskuitupuunkin metsäkuljetus noin 60 % kalliimpaa kuin kokopuu paalien metsäkuljetus.

Vuonna 2007 Biotukki Oy esitteli pieniläpimittaisen puun korjuuseen suunnitellun ensimmäisen kokopuupaalain-prototyypin –Fixteri I:n. Jylhän ja Laitilan (2007) tutkimuksessa havaittiin, että paalaimen suorituskyky ei ollut kilpailukykyinen verrattuna muihin käytössä oleviin kokopuun korjuumenetelmiin. Jylhän ja Laitila (2007) sekä Kärhä ym. (2007) arvioivat, että tekniset edellytykset paalaimen tuottavuuden parantamiseen olivat kuitenkin hyvät, mikäli kokopuun hakkuuta ja syöttöä paalaimen pystyttäisiin tehostamaan. Aikaisemman kehitystyön ja työntutkimuksissa saatujen kokemusten pohjalta Fixteri Oy käynnisti kokopuupaalaimen toisen prototyypin (Fixteri II) kehittämisprojektin kevättalvella 2007.

Vuonna 2009 Metsätehon koordinoimassa kokopuun paalaus –tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset tutkimushankkeessa selvitettiin Fixteri II –kokopuupaalaimen perustuvan aines- ja energiapuun hankinnan kilpailukykyä (Kärhä ym. 2009). Tutkimuksen testeissä Fixteri II paalaimen tehotuntuottavuus oli huomattavasti korkeampi kuin ensimmäisen prototyypipaalaimen. Tuottavuuden paranemiseen vaikutti merkittävästi, että Fixteri II:n uudella hakkuupäällä pystyttiin syöttämään puut hakkuun ja taakan keruun jälkeen suoraan paalaimen ilman erillistä väliskausta ja kuormausta. Samoin puiden keruu joukkokäsittelyllä oli huomattavasti tehokkaampaa kuin Fixteri I:n hakkuupäällä (Kärhä ym. 2009, Nuutinen ym. 2011). Kärhä ym. (2009) tekemät kannattavuuslaskennat kuitenkin osoittivat, että Fixteri II:n tuottavuusparannus ei riittänyt kilpailukykyiseen kokopuun paalaukseen pieniläpimittaisen puun korjuussa. Vuonna 2012 Fixteri Oy lanseerasi kokopuupaalaimen kolmannen version – Fixteri FX 15a.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksessa selvitettiin Fixteri FX15a –kokopuupaalaimen tuottavuus puustoltaan erikokoisissa mäntyvaltaisissa ensiharvennusvaiheen metsissä. Edelleen selvitettiin koneyksikön työvaiheiden rakennetta todellisessa hakkuuympäristössä sekä määritettiin hakkuupään ja paalaimen maksimaalinen tuotantotaso erillisissä testeissä. Saaduilla tuloksilla pyrittiin osoittamaan Fixterin -koneyksikön kehittämiskohteita; eritoten keskityttiin aikaisemman paalaimen mallin tutkimuksessa merkittäväksi kehittämiskohteeksi todettuun kokopuiden joukkokäsittelyhakuuseen ja puunipujen syöttöön paalaimen. Aikatutkimuksen tuloksilla täydennettiin aikaisempaa tietämystä poistuman optimaalisesta alueesta kokopuunpaalauksessa ensiharvennusleimikoissa.

Tutkimus toteutettiin Metsätutkimuslaitoksen ja Skogforsk:n yhteistutkimuksena. Tutkimuksen suunnittelivat Bengt Karlsson (Sveaskog), Tommy Nilsson (Sveaskog), Rolf Björheden (Skogforsk) ja Yrjö Nuutinen (Metsätutkimuslaitos). Yrjö Nuutinen vastasi koko tutkimuksen toteutuksesta: tutkimusleimikoiden suunnittelusta, aikatutkimusaineiston keruusta, paalaintestin toteutuksesta sekä tutkimuksen tulosten laskennasta. Yrjö Nuutinen ja Rolf Björheden raportoivat tutkimuksen. Miika Järvinen Fixteri Oy:stä avusti tutkimusleimikoiden kartoituksessa ja Fixteri Oy:n henkilöstö osallistui aikatutkimuksen ja paalaintestin kenttätöiden käytännönjärjestelyihin.

2 Aineisto ja menetelmä

2.1 Tutkittava koneyksikkö ja sen työmenetelmä

Tutkitun koneyksikön muodosti Nisula 280E+ joukkokäsittelyhäkkuulaite, Logman 811FC alustakone sekä Fixteri FX15a paalain (kuva 1). Fixteri paalain asennetaan alustakoneen kuorimatilan päälle. Paalain ottaa sähkö- ja hydraulikkajärjestelmän käyttövoiman alustakoneesta ja sen toimintoja ohjataan alustakoneen ohjaamon käsikahvoista. Ohjaamosta saadaan informaatio paalaimen toiminnasta ja tuotantomääristä. Paalaimen leveys on 240 cm, pituus 410 cm, korkeus 280 cm ja paino noin 8 500 kg. Koko koneyksikön kokonaispituus, korkeus, leveys ja paino ovat 890 cm, 390 cm, 290 cm ja noin 23 500 kg (Fixteri Oy 2014ac).



Kuva 1. Fixteri-koneyksikön muodostaa Nisula 280E+ joukkokäsittelyä hakuu-laite, Logman 811FC alus-takone sekä Fixteri FX15a paalain (kuva Yrjö Nuutinen/Metla).

Fixterin korjuumenetelmä on karsimattoman kokopuun korjuu, jossa kokopuut katkaistaan niiden tyvestä joukkokäsittelyllä hakuu-laiteella. Tämän jälkeen katkaistu puunippu syötetään paalaimen syöttöpöydälle, josta syöttörullat vetävät puut paalaimen syöttökammioon. Samassa yhteydessä syöttökammion suulle asennettu giljotiini-terä katkaisee automaattisesti kokopuurungot 2,6 metrin pituuteen. Syöttökammioista katkotut rungot nostetaan välikammioon. Kun välikammiossa on riittävästi puita yhteen paaliin, puunippu nostetaan ylös paalaimen puristuskammioon, jossa puunippu tiivistetään ja sidotaan paaliksi. Sidontaan käytetään verkkoa tai ns. sisal-narua paalien loppukäyttöpaikan tarpeiden mukaan. Tässä tutkimuksessa paalit sidottiin verkolla. Sidonnan jälkeen paalain mittaa ja rekisteröi automaattisesti koneen tietokoneelle valmiin paalin tuorepainon ja punnitusajankohdan, jonka jälkeen se pudotetaan paalaimesta ajouran vasemmalle puolelle (kuva 1). Paalit kuljetetaan metsästä perinteisillä kuljetuskalustoilla käyttöpaikalle. Fixteri -paalaimella voidaan puuston rakenteen ja loppukäytön mukaan paalata samanaikaisesti sekä kuitupuun- että energiapuupaaleja (Kärhä ym. 2009, Nuutinen ym. 2011, Fixteri Oy 2014a).

2.2 Hakkuun aikatutkimus (osatutkimus 1)

Fixteri-koneyksikön hakkuun testaus toteutettiin maaliskuussa 2013 Jyväskylän ympäristössä kolmella puustoltaan erilaisella kuviolla. Testikuviot valittiin seuraavien kriteerien mukaan:

1. *Energiapuu, tiheä alikasvos*: Mäntyvaltainen, jossa hakkuuta haittaava tiheä alikasvos. Poistuman rinnankorkeusläpimitta 6–9 cm. Ikä 25–30 vuotta (kuva 2).
2. *Energiapuu, ei alikasvosta*: Mäntyvaltainen, jossa ei alikasvosta. Poistuman rinnankorkeusläpimitta 6–9 cm. Ikä 25–30 vuotta (kuva 3).
3. *Ainespuu, ei alikasvosta*: Mäntyvaltainen, jossa ei alikasvosta. Poistuman rinnankorkeusläpimitta 10–14 cm. Ikä 35–40 vuotta (kuva 4).



Kuva 2. Hakkuun testikuvio 1: Energiapuu, tiheä alikasvos (kuva Miika Järvinen/Fixteri Oy).



Kuva 3. Hakkuun testikuvio 2: Energiapuu, ei alikasvosta (kuva Miika Järvinen/Fixteri Oy).



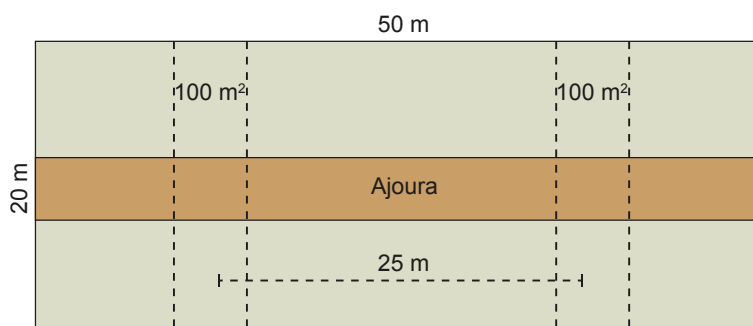
Kuva 4. Hakkuun testikuvio 3: Ainespuu, ei alikasvosta (kuva Miika Järvinen/Fixteri Oy).

Testihakkuussa kokopuurungot hakattiin ja paalattiin energiapuupaaleiksi. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 6 cm puut hakattiin ja paalattiin vain, jos ei se haitannut tai hidastanut työprosessia.

Aikatutkimus tehtiin yhteensä yhdeksällä koealalla. Jokaiselle kuviolle mitattiin ja merkittiin ennakoon kolme aikatutkimuskoealaa. Koealan pituus oli 50 metriä ja leveys 20 metriä. Keskelle koealaa merkittiin ajoura eli ajouran keskeltä oli 10 metriä koealan reunaan, mikä oli myös kaatopään maksimi ulottuvuus. Koealat sijoitettiin kuviolle niin, että puusto niiden kesken oli mahdollisimman samankaltainen. Kaikilla kuvioilla maasto oli tasainen ja tutkittavalle koneelle helpokulkuinen. Koealojen hakkuun jälkeinen jäävä puusto mitattiin 100 m² puustomittausaloilta (kuva 5).

Poistettujen puiden määrä tallentui maastotallentimelle aikatutkimuksen aikana ja poistuman kuorellinen kiintotilavuus tilavuus laskettiin paalaimella mitatuista paalien tuorepainoista käyttämällä tuoretiheyden muuntolukua 855 kg/m³ (Lindblad ym. 2010ab, Lindblad 2013). Taulukossa 1 kuvataan koealoilta mitatut puustotiedot ennen ja jälkeen hakkuuta.

Aikatutkimuksessa testihakkuuta havainnoi yksi työntekijä, jolloin hän tallensi työvaiheiden ajanmenekit Rufco DL2 maastotallentimelle jatkuva-aika menetelmällä. Siinä jokaiselle työvaiheelle tallennetaan työvaiheen loppumisaika. Maastotallentimessa käytetty ajanmittausohjelma laskee ja tallentaa automaattisesti eri työvaiheiden ajanmenekit. Taulukossa 2 on esitetty hakkuun aikatutkimuksessa käytetty työvaihejako.



Kuva 5. Aikatutkimuksen koeala, jossa kaksi puustomittausalaa.

Taulukko 1. Aikatutkimuskoealojen poistuma sekä jäävä puusto testikuvioittain.

		Energiapuu, tiheä alikasvos	Energiapuu, ei alikasvosta	Ainespuu, ei alikasvosta
Puusto ennen hakkuuta	kpl/ha	4033	2836	1999
	ikä, v	25–30	25–30	35–40
Poistuma, kokopuut	kpl/ha	3216	2019	1266
	keskikoko, dm ³	27	44	84
Puusto hakkuun jälkeen	kpl/ha	817	817	733
	m ³ /ha*	57	45	76
	% -mä/ku/ko	73/2/24	100/0/0	86/5/9

*rungon tilavuus

Taulukko 2. Testihakkuun aikatutkimuksen työvaiheet, niiden kuvaus ja mittaus-prioriteetti.

Työvaihekoodi	Mittaus-prioriteetti	Työvaiheen kuvaus
1	2	Siirtyminen
2	1	Kouran vienti puulle
3	1	Hakkuu ja puiden keruu, $d_{1,3} \geq 6$ cm
33	1	Hakkuu ja puiden keruu, $d_{1,3} < 6$ cm
4	1	Taakan tuonti paalaimelle
5	1	Taakan syöttö paalaimen
6	1	Kaadettujen puiden järjestely
66	1	Valmiiden paalien järjestely
7	3	Paalaus
8	3	Paalin pudotus/punnitus
9		Keskeytys

Testihakkuussa mitattiin kaikki ja hakkupään toimintojen aika. Tämä varmistettiin siten, että työajamittauksessa etusijalla olivat työvaiheet hakkuu ja puiden keruu (3, 33) taakan tuonti paalaimen tuonti (4), taakan syöttö paalaimen (5), puiden (6) ja paalien järjestely (66). Siirtymistä (2) ja paalaimen toimintaa (7, 8) mitattiin vain jos hakkuupäässä ei ollut toimintoja ts. niiden työaika ei rekisteröitynyt silloin, kun niitä tapahtui samanaikaisesti hakkupään toimintojen aikana.

2.3 Tekninen tuottavuusanalyysi (osatutkimus 2)

Tutkittavan koneyksikön muodostaa kolme erillistä yksikköä: 1) Fixteri paalain, 2) alustakone, jonka kuormatilaa päälle paalain asennetaan sekä 3) nosturi ja siihen kiinnitetty joukkokäsittely-ominaisuudella varustettu hakkupää. Teknisessä tuottavuusanalyysissä verrattiin hakkupään/nosturin ja paalaimen teknisiä tuottavuustasoja. Tavoitteena oli selvittää olivatko puiden hakkuun ja paalien valmistuksen tuotantokapasiteetit tasapainossa ja mitkä olisivat niiden kehittämiskohteita tuottavuuden parantamiseksi.

Taulukossa 3 on eritelty tuottavuusanalyysissä käytettyjen puiden ominaisuudet, missä poistettavien kokopuiden tuoremassa laskettiin Repolan (2009) kuivamassa malleilla, kuivamassa muunnettiin tuoremassoiksi kosteusprosentilla 55 %, puiden pituudet laskettiin Siipilehdon (2009) pituusmalleilla ja kokopuiden tuorepainot muunnettiin kiintotilavuuksiksi tuoretiheydellä 855 kg/1 m³ (Lindblad ym. 2010ab, Lindblad 2013).

Hakkuun tuotantokapasiteetti

Hakkuun tuottavuustarkastelun tarkoituksena oli selvittää nosturin ja hakkupään keräyskapasiteetti tuoda puita paalainyksikköön paalien valmistukseen. Tuottavuus laskettiin suurimmalle mahdolliselle puiden määrälle hakkupäässä (= maksimi taakka) kantoläpimitoille 5 cm (= 4,50–5,49 cm)–17 cm. Tutkitun hakkupään valmistaja määrittäi hakkupään suurimman keräyskapasiteetin kantoläpimittaluokittain (Nisula Forest Oy 2013), joka on teoreettinen keskiarvo (taulukko 3). Käytännön työssä puiden lukumäärä hakkupäässä voi poiketa keskiarvosta, mihin vaikuttaa puiden oksaisuus, mutkaisuus, pituus, puiden asettuminen hakkupäähän sekä kuljettajan ammatitaito. 15–17 cm kantoläpimitoissa puut prosessoidaan yleensä yksitellen. Tätä suurempien puiden kaato, siirtely ja syöttö paalaimen ei tutkittavalla hakkupäällä yleensä onnistu nopeasti ja hallitusti jäävän puuston seassa (Nisula Forest Oy 2013).

Taulukko 3. Teknisessä tuottavuusanalyysissä käytettyjen puiden ominaisuudet.

Kantoläpimitta, cm	Rinnankorkeus-läpimitta, cm	Pituus, m	Kokopuun tilavuus, dm ³	Kokopuun tuorepaino, kg	Hakkuupään keräyskapasiteetti
5	2,4	3,9	3,0	2,6	11
7	4,0	5,9	7,5	6,4	7
9	5,6	7,5	15,4	13,2	5
11	7,2	8,8	27,5	23,5	3
13	8,8	9,9	44,4	38,0	2
15	10,4	10,7	66,3	56,7	1
17	12,0	11,5	93,2	79,7	1

Tuottavuudet laskettiin 500 kg tavoitepaalille kantoläpimitoittain hakkuupään täyden taakan kiintotilavuuden sekä sen keruuseen ja paalaimen syöttöön kuluneen ajan perusteella (taulukko 3, kaava 1, kuva 11). Täyden taakan ajanmenekkiin yhdistettiin ajat työvaiheista hakkuupään vienti puulle (2), puiden kaato ja niiden keruu (3, 33), täyden taakan tuonti paalaimelle (4) sekä sen syöttö paalaimen (5). Ajanmenekille laadittiin malli, jossa täyden taakan ajanmenekkiä selitettiin täyden hakkuupään puiden lukumäärällä (kaava 1, kuva 11). Malli laskettiin testikuvion 2 – energiapuu, ei alikasvos- aikatutkimusaineistolla.

Paalauksen tuotantokapasiteetti

Paalaimen paalinvalmistusprosessia videoitiin syyskuussa 2013 Kuhmoisissa todellisessa hakkuuympäristössä. Noin tunnin mittaisesta videomateriaalista määritettiin paalaimen toiminnan osavaiheet sekä mitattiin niiden ajanmenekit ja rakenne. Videomateriaalista saatua kokonaiskuvaa paalaimen toiminnasta hyödynnettiin varsinaisessa tuottavuuslaskennassa. Oikeassa työympäristössä paalain saa sähkö- ja hydraulikkajärjestelmän käyttövoimansa alustakoneesta mikä vaikuttaa paalainyksikön tuottavuuteen. Puiden hakkuun aikana paalaimen käyttöön saamaa tehoa rajoittaa hakkuulaitteen ja nosturin tarvitsema käyttövoima alustakoneesta. Myös puiden syöttönopeus paalaimen vaikuttaa paalien valmistumisnopeuteen.

Koneen valmistajan kehittämällä (Fixteri Oy 2014b) paalaimen teknisen tehokkuuden Excel -laskentamatriisilla laskettiin paalausprosessin osavaiheiden lyhimmät tekniset ajanmenekit, kokonaisaika ja kokonaisaika vastaava tehotuntituottavuus. Matriisiin asetettiin oletusarvoksi, että paalaimen syötetään keskeytyksettä hakkuupään täysiä kourataakkoja puiden kokoluokittain maksimaalisen paalausprosessiin edellyttämässä tahdissa. Puiden kokoluokat täysille kourataakoille olivat samat kuin kuormaimen ja hakkuupään tuotantokapasiteetin laskennassa (taulukko 3). Jokaiselle kantoläpimittaluokalle asetettiin tavoitepaali, jonka prosessoinnille paalaimessa laskettiin ihanneaika. Tavoitepaalin paino määritettiin mahdollisimman lähelle 500 kg. Tavoitepaino määräytyi täyden taakan painon ja tavoitepaalin tarvittavien kokonaisten taakkojen kappalemäärän mukaan. Paalaimen tekniset ominaisuudet olivat laskentamatriisissa vakioita. Puiden kokoluokittain muuttuvat syöttötiedot olivat:

- tavoitepaalien dimensiot ja paino
- puiden kantoläpimitta, pituus ja kiintotilavuus
- puiden lukumäärä täydessä hakkuupäässä
- tarvittava kokonaisten taakkojen lukumäärä tavoitepaalin valmistukseen
- tavoitepaalin sidontakierrokset

Laskentamatriisilla määritettiin tavoitepaalin valmistuksen osatoimintojen (puunipun syöttö ja katkonta paalaimessa, puiden nosto paalaimen yläosaan ja paalin tiivistys sekä sidonta) lyhimmat mahdolliset ajanmenekit, kokonaisajanmenekki sekä tuottavuus.

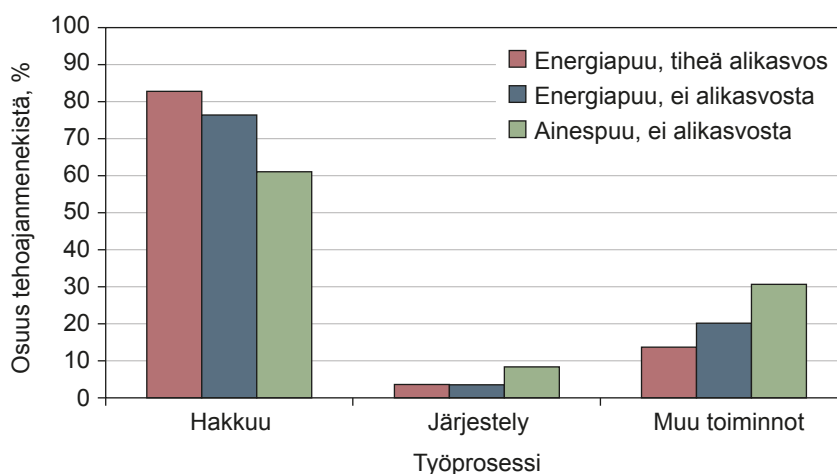
3 Tulokset

3.1 Tehoajanmenekin rakenne (osatutkimus 1)

Kokopuun paalauksen tehollinen työaika jaettiin hakkuun aikatutkimuksessa (osatutkimus 1) mitattujen työvaiheiden mukaisesti (Taulukko 2) kolmeen osaprosessiin:

- Hakkuu – aika, joka sisältää hakkuulaitteen viennin puulle, puiden kaadon ja hakkuulaitteeseen keruun, taakan tuonnin paalaimen sekä puunipun syötön paalaimen (työvaiheet 2, 3, 33, 4 ja 5).
- Järjestely – aika, kun jo kaadettuja puita sekä valmiita paaleja siirrellään nosturilla ja hakkuulaitteella (työvaiheet 6 ja 66).
- Muut toiminnot – aika, jolloin nosturissa ja hakkuulaitteessa ei ole toimintoja. Voi sisältää työkoneneen siirtymisiä ja paalaimen toimintoja (työvaiheet 1, 7 ja 8). Ei kuitenkaan sisällä hakkuu ja järjestely työprosessien kanssa samanaikaisia toimintoja.

Paalauksen tehotyöajasta hakkuun osuus laski 83 %:sta 61 %:iin kun poistettujen kokopuiden keskikoko kasvoi 27 dm³:stä 84 dm³:iin. Samalla järjestelyn osuus nousi 3,6 %:sta 8,3 %:iin (kuva 6, taulukko 1).

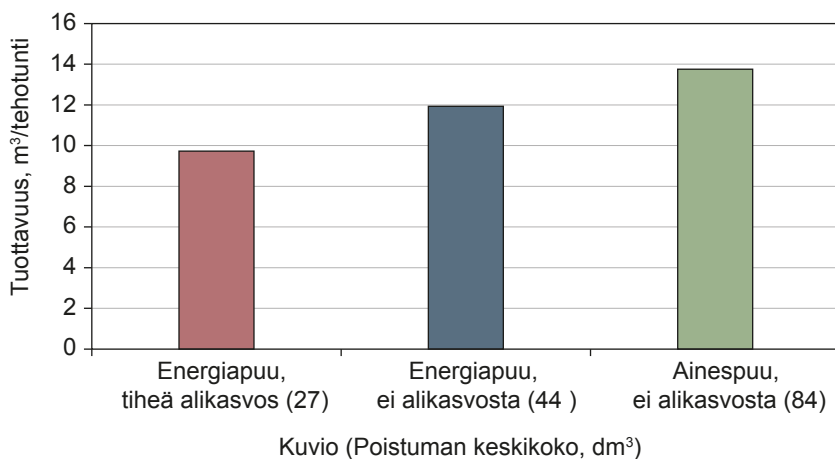


Kuva 6. Työprosessien hakkuu, järjestely ja muut toiminnot osuudet tehoajanmenekistä.

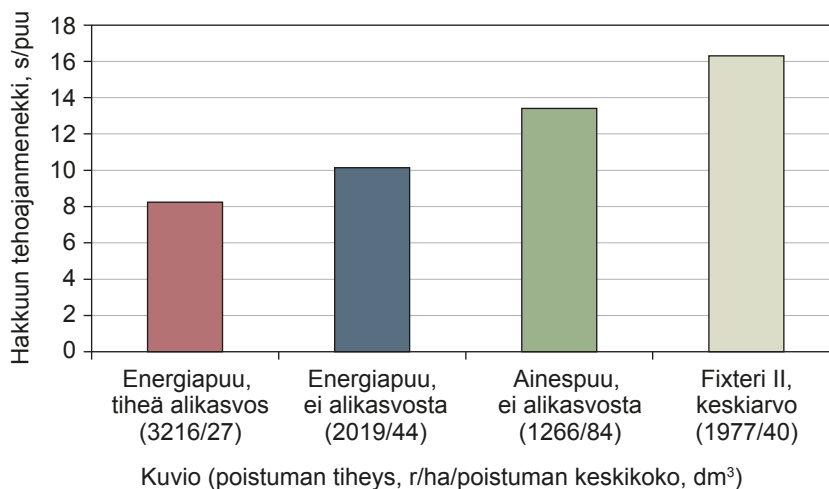
3.2 Tuottavuus (osatutkimus 1)

Testikuviolla *energiapuu, tiheä alikasvos* paalaimen tuottavuus oli aikatutkimuksen havaintoaloilla keskimäärin 9,7 m³ tehotunnissa, kun poistettavien kokopuiden keskikoko oli 27 dm³ ja niiden määrä 3216 puuta/hehtaari. Kuviolla *energiapuu, ei alikasvosta* tehotuntituottavuus kohosi 11,9 m³:iin poistettavien kokopuiden keskikoon kasvaessa 44 dm³:iin, jolloin niiden tiheys oli 2019 puuta/hehtaari. Vastaavasti kuviolla *ainespuu, ei alikasvosta* paalain ylsi 13,8 m³ tuotokseen 84 dm³ kokoisilla kokopuilla, joita harvennettiin 1266 puuta hehtaarilta (kuva 7, taulukko 1).

Hakkuu työprosessin (työvaiheet 2, 3, 33, 4 ja 5) tehoajanmenekki oli keskimäärin 8,2 s/puu kuviolla *energiapuu, tiheä alikasvos*, 10,1 s/puu kuviolla *energiapuu, ei alikasvosta* ja 13,4 s/puu kuviolla *ainespuu, ei alikasvosta*. Hakkuun ajanmenekki siis kasvoi poistettavien puiden tilavuuden kasvaessa. Keskimäärin kolmella testikuviolla hakkuuseen kului aikaa 10,6 s/puu (kuva 8). Vastaavasti Fixteri II –kokopuupaalaimen tutkimuksessa (Kärhä ym. 2009 ja Nuutinen ym. 2011) hakkuu työprosessin tehoajanmenekki oli 28 havaintoalan keskiarvona 16,3 s/puu, kun poistettavien kokopuiden keskikoko oli 40 dm³ ja niiden määrä 1977 puuta hehtaarilla. Fixteri II tutkimuksen havaintoalat olivat samanlaisia kuin tässä tutkimuksessa.



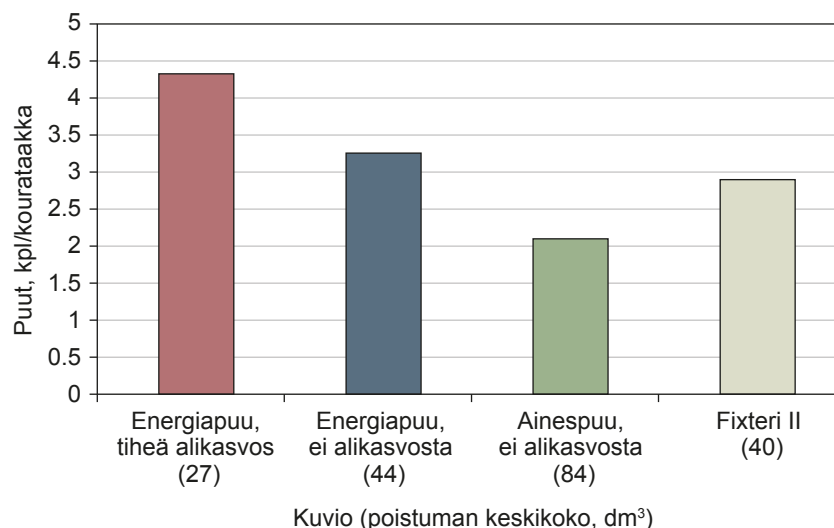
Kuva 7. Kokopuupaalaimen tehotuntituottavuus kolmella testikuviolla.



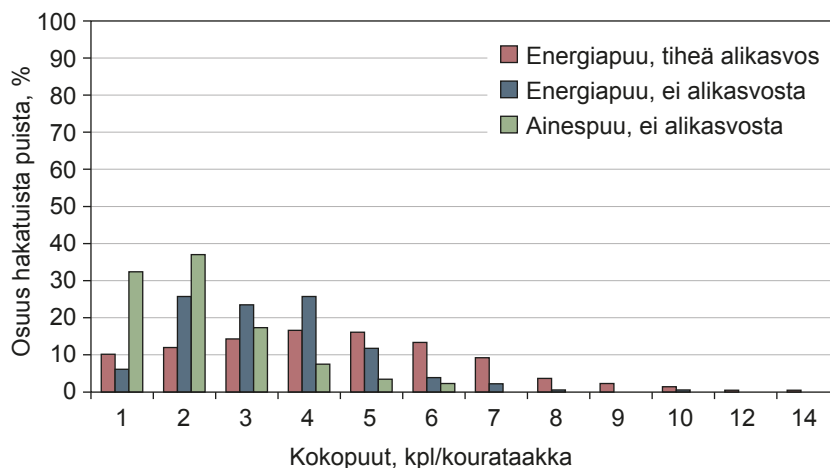
Kuva 8. Hakkuu työprosessin keskimääräisen tehoajanmenekit (s/puu) tutkimuksen testikuviolla sekä Fixteri II-tutkimuksessa.

Iwarsson Wide (2010) on todennut, että puiden määrä kourataakassa on merkittävä tekijä pieniläpimittaisen puuston joukkokäsittelyhakuun tehokkuudessa. Belbon (2011) simulointitutkimuksessa havaittiin, että optimaalinen taakkakoko joukkokäsittelyhakuussa oli neljästä viiteen puuta/taakka. Tässä tutkimuksessa kuviolla *energiapuu, tiheä alikasvos* taakkakoko oli keskimäärin 4,3 puuta/taakka. Vastaavasti kuviolla *energiapuu, ei alikasvosta* taakan koko oli 3,3 puuta/taakka ja kuviolla *ainespuu, ei alikasvosta* 2,1 puuta/taakka (kuva 9). Kun poistettavien puiden koko kasvoi niin niiden määrä taakassa selvästi väheni. Keskimäärin tämän tutkimuksen testikuviolla taakan koko oli 3,2 puuta/taakka. Fixteri II paalaimella oli taakassa keskimäärin 2,9 puuta (Kärhä ym. 2009 ja Nuutinen ym. 2011).

Kuva 10 esittää joukkokäsiteltyjen puiden taakkakohtaisen jakauman testikuvioittain, joka kuvaa hakkuun joukkokäsittelyastetta. Joukkokäsittelyn hyödyntämistäasteeseen vaikuttaa koneen ja varsinkin hakkuulaitteen soveltuvuus poistettavan puuston tiheyteen ja järeyteen sekä kuinka kuljettaja osaa hyödyntää hakkuussa koneyksikön teknisiä ominaisuuksia. Kuviolla *energiapuu, tiheä alikasvos* 90 % puista hakattiin joukkokäsittelynä eli, että kourataakkaan kerättiin kaksi tai useampia puita. Vastaava joukkokäsittelyaste kuviolla *energiapuu, ei alikasvosta* oli 94 % ja kuviolla *ainespuu, ei alikasvosta* 68 %. Vähintään kolmen puun kourataakan osuudet korjatuista puista olivat em. järjestyksessä 78 %, 68 % ja 31 %. Energiapuukuviolla, jossa oli tiheä alikasvos, joukkokäsittelyä hyödynnettiin tehokkaimmin. Siellä 47 % korjatuista puista hakattiin vähintään viiden puun kourataakoissa, jolloin enimmillään taakoissa oli jopa 14 puuta. Vastaavat osuudet energiapuukuviolla ja ainespuu kuviolla, jossa ei ollut tiheää alikasvosta, olivat 19,0 % ja 5,8 %. Kolmen testikuvion keskimääräinen joukkokäsittelyaste –vähintään kaksi puuta taakassa– oli 84 % kun vastaavasti aikaisemmalla Fixteri II-koneella päästiin 80 % asteeseen (Kärhä ym. 2009 ja Nuutinen ym. 2011).



Kuva 9. Taakkakoko tutkimuksen testikuvioilla sekä Fixteri II-tutkimuksessa.



Kuva 10. Joukkokäsiteltujen taakkojen (puiden lukumäärä/taakka) osuus hakatuista puista.

3.3 Tekninen tuottavuusanalyysi (osatutkimus 2)

Hakkuun tuotantokapasiteetti

Nosturin ja hakkuulaitteen tuottavuuteen vaikutti taakan koko ja sen hakkuuaika. Taakan hakkuu-aikaan kuului hakkuulaitteen vienti puulle, puiden kaato ja hakkuulaitteeseen keruu, taakan tuonti paalaimen sekä sen syöttö paalaimen (työvaiheet 2, 3, 33, 4 ja 5). Maksimi taakan kokoon vaikutti poistettavien puiden tilavuus sekä montako tällaista puuta mahtui täyteen hakkuupäähän (taulukko 3). Hakkuuaika ennustettiin kantoläpimittaluokittain (taulukko 3) regressiomallilla, jonka laskentaan käytettiin hakkuun aikatuotkimuksessa (osatutkimus 1) mitattujen työvaiheiden ajanmenekkejä testikuviolta 2 *energiapuu, ei alikasvosta*. Mallin voidaan olettaa edustavan ihanneaikoja. Tämä perustuu kokemukseen, että todellisessa hakkuuympäristössä puiden keruu ja syöttö paalaimen sujuu ongelmitta, mikäli rungot ovat suorja ja vähäoksaisia. Mallissa täyden taakan hakkuuaikaa selitettiin puiden määrällä hakkuupäässä (taulukko 3). Yhteensä mallissa oli mukana 171 taakkaa (kaava 1, kuva 11):

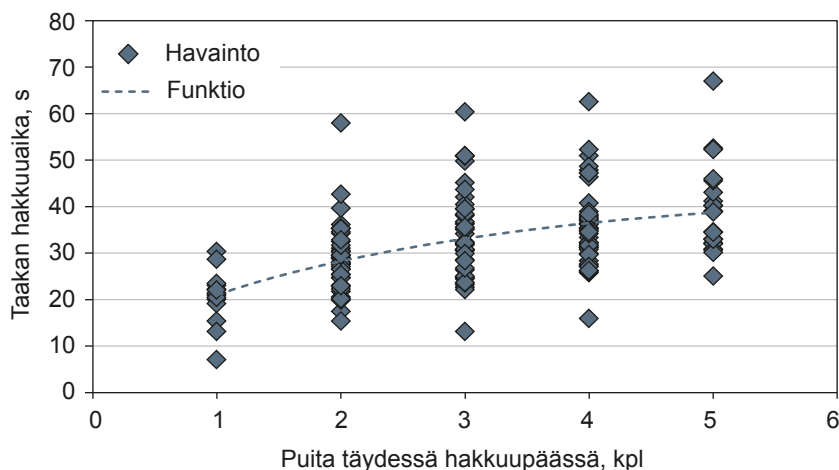
$$t_h = 10,982 \ln(n) + 20,946 \quad (1)$$

t_h = taakan hakkuun ajamenekki (työvaiheet 2, 3, 33, 4, 5), s

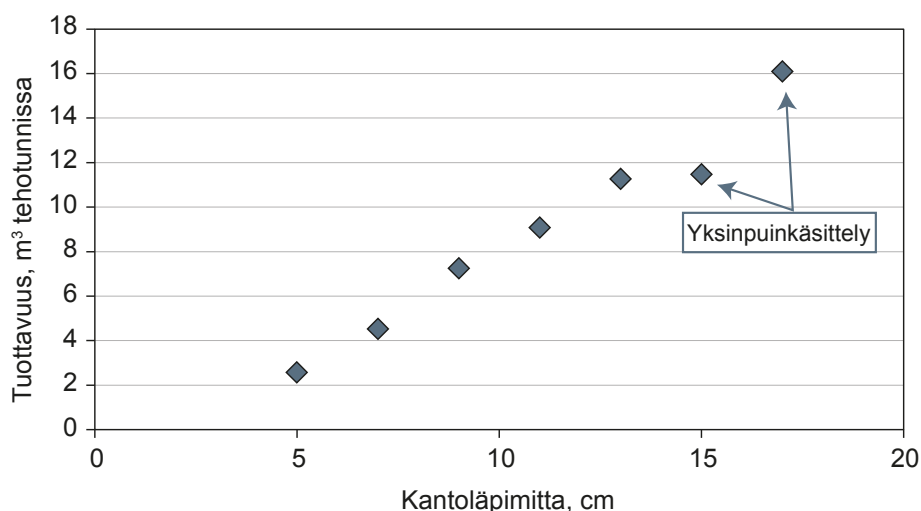
n = hakattujen puiden määrä täydessä hakkuupäässä

$$R^2 = 0,2519$$

Joukkokäsiteltujen puiden tilavuuden kasvu paransi voimakkaasti hakkuun tuottavuutta; kun kokopuun kantoläpimitta/tilavuus oli 5 cm/3,0 dm³, hakkuun tehotuntituottavuus oli 2,5 m³/h ja vastaavasti suurimassa kokoluokassa 17 cm/93,2 dm³ tuottavuus kasvoi 16,0 m³:ään tehotunnissa. Kun kantoläpimitta kasvoi 13 cm:stä 15 cm:ään, hakkuupäällä ei ollut enää mahdollista tehdä joukkokäsittelyhakkuuta. Tällöin tuottavuus kasvoi vain marginaalisesti 11,2 m³:stä 11,4 m³:ään tehotunnissa (kuva 12, taulukko 3).



Kuva 11. Joukkokäsiteltyjen puiden lukumäärän vaikutus täyden taakan hakkuu-aikaan.



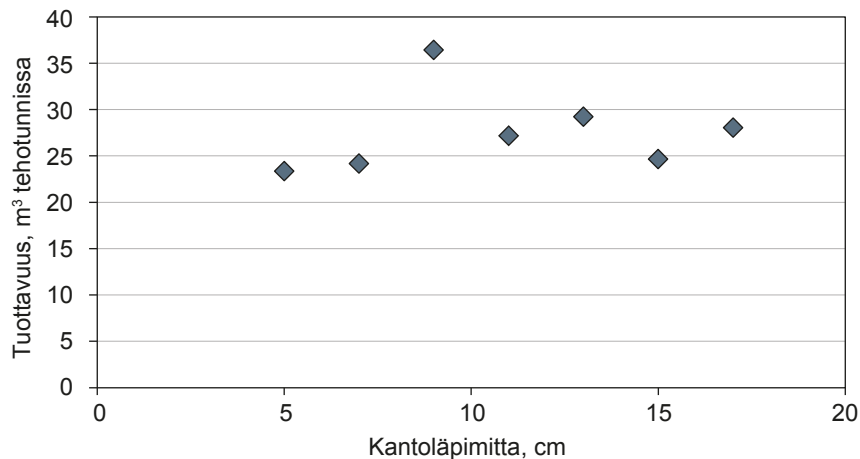
Kuva 12. Joukkokäsiteltyjen puiden koon vaikutus täydessä taakassa hakkuun tuottavuuteen taulukon 3 mukaisesti.

Paalauksen tuotantokapasiteetti

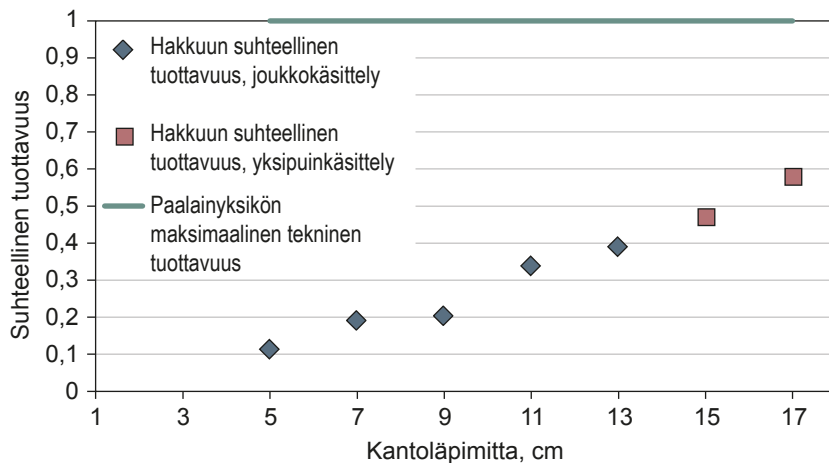
Paalaimen tuottavuus oli 23,3 m³–36,3 m³ tehotunnissa. Paalaimen syötettävän taakan koolla ja pituudella oli positiivinen vaikutus paalaimen tuottavuuteen. Tämä johtui siitä, että suurimpien ja samalla myös pisimpien puunippujen syöttö ja katkonta paalaimen syöttökammiossa nopeutui. Eniten tuottavuuteen vaikutti tavoitepaalin koko. Kun tavoitepaali painoi 505,5 kg, oli tuottavuus pienimmillään. Korkein tuottavuus saavutettiin 526,4 kg painoisen tavoitepaalin valmistuksessa (kuva 13).

Hakkuun ja paalauksen tuotantokapasiteetin välinen tasapaino

Hakkuun ja paalauksen tuotantokapasiteettien tasoa verrattiin antamalla paalauksen tuottavuusluville arvo yksi, johon hakkuun vastaavia arvoja verrattiin. Hakkuun tuottavuus oli paalauksen tuottavuudesta 11–57 % kun prosessoitavien puiden kantoläpimitta oli 5–17 cm. Tuottavuusero kasvoi puiden koon pienentyessä (kuva 14). Tulos osoittaa, että todellisessa hakkuuympäristössä puiden hakkuu rajoittaa koneyksikön tuottavuutta ts. mitä pienempiä puita paalataan, sitä enemmän paalainyksikkö joutuu odottamaan puiden syöttöä (kuva 14).



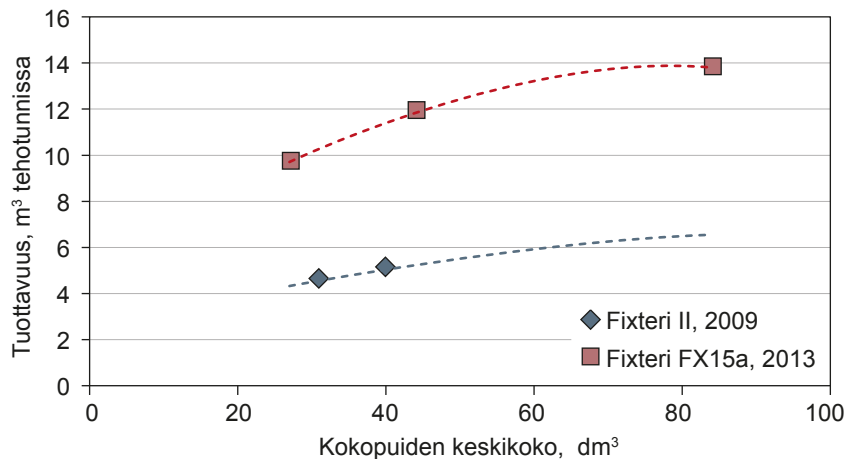
Kuva 13. Paalaimen maksimaalinen tuotantokapasiteetti täydessä hakkuupäässä olevien puiden kantoläpimitan suhteen taulukon 3 mukaisesti.



Kuva 14. Hakkuun maksimaalisen tuottavuuden osuus paalaimen maksimikapasiteetista on 0,1–0,6 prosessoitavien puiden kantoläpimitan suhteen. Kuvasta nähdään, että paalain joutuu odottamaan puiden syöttöä sitä enemmän, mitä pienempiä puita prosessoidaan.

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimuksessa uuden paalainmallin (Fixteri FX15a) tuottavuus oli 9,7 m³/tehotunti energiapuukuviolla, jossa oli tiheä alikasvos (poistettavien kokopuiden keskikoko 27 dm³). Tehotuntituottavuus kohosi 11,9 m³:iin energiapuukuviolla, jossa ei ollut alikasvosta poistuman keskikoon kasvaessa 44 dm³:iin. Vastaavasti uusi paalain ylsi 13,8 m³ tuntituotokseen normaalilla ainespuukuviolla, jossa poistettavien kokopuiden keskikoko oli 84 dm³. Aikaisemman Fixteri II –koko puupaalaimen tuottavuus oli 5,1 m³ tehotunnissa kun poistettavien kokopuiden keskikoko oli 40 dm³ ja poistuman tiheys 1400 puuta/ha ja vastaavasti 4,6 m³/tehotunti poistettavien puiden keski-



Kuva 15. Kokopuun paalauksen tehotuntuottavuus poistuman keskikoon suhteen tutkitulla koneyksiköllä (Fixteri FX15a) ja edellisellä Fixteri II koneyksiköllä (Kärhä ym. 2009, Nuutinen ym. 2011).

koon ollessa 31 dm³ ja poistuman tiheyden 2850 puuta/ha. Uusimman Fixteri FX15a paalaimen tehotuntuottavuus oli siis poistettavien kokopuiden koosta ja määrästä riippuen 2,1–2,3 kertaa korkeampi kuin edellisen Fixteri II-paalaimen (kuva 15).

Tulosten mukaan kokopuunpaalauksen huomattavaa paranemista selittää Fixterin uudistetun hakkuulaitteen tehokkaampi puiden joukkokäsittely sekä entistä suurempien puunippujen nopeampi syöttö paalaimen. Puiden hakkuun ajanmenekki runkoa kohden (aika, joka sisältää hakkuulaitteen viennin puulle, puiden kaadon ja hakkuulaitteeseen keruun, taakan tuonnin paalaimen sekä puunipun syötön paalaimen) oli 35 % lyhempi kuin edelliselle Fixteri II paalaimella (kuva 8). Nisula 280E+ joukkokäsittelyllä hakkuulaiteella puiden määrä taakkaa kohden oli myös suurempi kuin edellisessä tutkimuksessa käytetyllä Fixteri-hakkuulaitteella (kuva 9).

Tutkimuksen testihakkuissa uusi joukkokäsittely hakkuupää soveltui parhaiten energiapuukuvioiden korjuuseen, joissa poistettujen kokopuiden keskikoko oli 27–44 dm³. Ainespuukuvioilla harvennettavat puut (keskikoko 84 dm³) osoittautuivat liian suuriksi tehokkaaseen joukkokäsittelyyn. Em. johtopäätöksiä tukevat seuraavat tutkimuksen tulokset:

- joukkokäsittelyaste, jolloin taakassa kaksi tai useampia puita, oli ainespuukuvion hakkuussa 68 % kun energiapuukuvioiden hakkuussa ne olivat 90 % ja 94 %,
- kun taakassa kolme tai useampia puita, joukkokäsittelyaste oli ainespuukuvioilla vain 31 % ja energiapuukuvioilla vastaavat osuudet olivat 78 % ja 68 %,
- kaadettujen puiden järjestelyn (työvaihe 6) ajanmenekin osuus tehollisesta työajasta oli ainespuukuvion hakkuussa yli 7 %, kun energiapuukuvioilla se oli vain noin 3 %.

Teknisessä tuottavuusanalyysissä paalaimen tuottavuustaso oli 2–10 kertaa suurempi kuin hakkuun (kuva 14). Tulosten mukaan tutkittu Fixteri –koneyksikkö on tehokkaimmillaan kun paalataan puita, joiden rinnankorkeusläpimitta on välillä 6–9 cm. Suuremmilla puilla hakkuupään joukkokäsittelyn hyödyntäminen vaikeutuu; tällöin ei saavuteta etua perinteiseen yksiotteharvesterin hakkuuseen ja pienempien puiden korjuukustannus nousee todennäköisesti liian korkeaksi. Tuottavuuden parantamiseksi tulisi kehitystyö kohdistaa hakkuupään joukkokäsittelyominaisuuksien ja paalaimen syötön parantamiseen:

- tehostamalla puomin käyttöä
- parantamalla hakkuupään joukkokäsittelyominaisuuksia
- tehostamalla puunippujen syöttöä paalaimiin
- tehostamalla useampien puiden kaatoa ja keruuta samanaikaisesti

Tässä tutkimuksessa ei kerätty näytteitä valmiista paaleista tuoretiheyden muuntoluvun määrittämiseksi. Tutkimuksessa käytetty muuntoluku 855 kg/m^3 perustui julkaisuihin Lindblad ym. (2010ab) ja Lindblad (2013). Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa tuoretiheys vaihteli $209\text{--}988 \text{ kg/m}^3$ välillä keskihajonnan ollessa 41 kg/m^3 . Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa hakkuun jälkeisten tuoreiden paalien kosteus oli $53\text{--}57 \%$, kun vastaavasti tässä tutkimuksessa käytettiin kosteusprosenttia 55.

Aikatutkimuksen suorittaneella työntutkijalla on noin 10 vuoden kokemus visuaaliseen havainnointiin perustuvasta manuaalisesta aikatutkimusmenetelmästä (Nuutinen 2005, 2013, Nuutinen ym. 2008). Aikatutkimuksissa työntutkija oli riittävän turvaetäisyyden päässä koneesta niin, ettei hänestä aiheutunut haittaa testihakkuille. Testihakkuiden aikana hänellä oli myös vaadittavat turvavarusteet, eli oranssi huomioliivi sekä kuulosuojaimin varustettu turvakypärä.

Lukuisissa tutkimuksissa selvitetty, että kuljettajan, koneen ja hakkuuympäristön (puuston koko ja tiheys sekä maaston korjuukelpoisuus) yhteisvaikutus puunkorjuun tuottavuuteen on merkittävä (Väätäinen ym. 2005, Kariniemi 2006, Ovaskainen 2009, Palander 2012). Tämän tutkimuksen testikuviot valittiin siten, että kuvion koko oli riittävä havaintoalojen sijoitukseen, puusto kuvion sisällä oli mahdollisimman tasainen ja maasto helppokulkuinen tutkittavalle koneelle. Tutkimuksen testihakkuut suoritti sama kuljettaja, joka oli harjaantunut tutkittavan kokopuupaalaimen käyttöön. Näillä koejärjestelyillä varmistettiin, että tutkimuksella saatiin mahdollisimman luotettavasti selville harvennettävien puiden koon ja tiheyden vaikutus kokopuun paalauksen tuottavuuteen. Nyt saadut Fixteri FX15a -kokopuupaalaimen tehollisen työajan tuottavuustulokset perustuvat aikatutkimuksen testihakkuisiin. Pitkässä seurannassa käytännön työmailla tuottavuus on keskeytysten takia alempi (Kuitto ym. 1994, Kärhä ym. 2006, Spinelli ja Visser 2008).

Hakkuukoneen kuljettajalla on todettu olevan suuri vaikutus työn tuottavuuteen (Sirén 1998, Ryyänen ja Rönkkö 2001, Laamanen 2004, Väätäinen ym. 2005, Kariniemi 2006, Purfurst ja Erler 2006, Ovaskainen 2009, Palander 2012). Väätäisen ym. (2005) tutkimuksessa kuljettajien väliset tuottavuuserot olivat suurimmillaan ensiharvennuksella, jossa ero oli samankaltaisissa hakkuuolosuhteissa enimmillään 42% kuljettajien välillä. Tämän tutkimuksen testihakkuut suoritti eri kuljettaja kuin edellisessä tutkimuksessa. On kuitenkin selvää, että uudella kokopuun paalaimella aikaa saatu tuottavuushyppy on merkittävästi koneyksikön teknisen kehittymisen ansiota. Tutkimuksen testihakkuissa Fixteri FX15a -kokopuupaalaimen tuottavuus parani prosessoitujen kokopuiden koosta riippuen $111 \%\text{--}133 \%$ verrattuna edelliseen Fixteri II malliin.

Lähteet

- Belbo, H. 2011. Efficiency of Accumulating Felling Heads and Harvesting Heads in Mechanized Thinning of Small Diameter Trees. Doctoral thesis. Linnaeus University Dissertations No. 66/2011. 42 s.
- Bergström, D. 2009. Techniques and systems for boom corridor thinning in young dense forests. Doctoral thesis No. 2009:87. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Forest Sciences. 53 s.
- Fixteri Oy. 2014a. [Internet sivu]. Saatavissa: <http://www.fixteri.fi/>.
- 2014b. Sähköpostitiedonanto, Roni Ryyppö, 10.12.2013.
- 2014c. Sähköpostitiedonanto, Roni Ryyppö, 15.1.2014.
- Iwarsson Wide, M. 2010. Technology and methods for logging in young stands. In: Efficient forest fuels supply systems (Thorsen, Å., Björheden, R. & Eliasson, L. Eds.) Skogforsk, 2010.
- Juntunen, M-L. & Herrala-Ylinen, H. (toim.). 2008. Metsien hoito. Julkaisussa: Peltola, A. (toim.). Metsätalastollinen vuosikirja 2008. Metsäntutkimuslaitos. SVT, Maa-, metsä- ja kalatalous 2008: 113–160.
- & Herrala-Ylinen, H. 2009. Metsänhoito- ja perusparannustyöt 2008. Metsäntutkimuslaitos, Metsätalastiedote 24/2009.
- 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.
- Kansallinen metsäohjelma 2010. 1999. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2/1999. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/kmo/asiakirjat_raportit/Kansallinen_metsaohjelma.pdf.
- Kariniemi, A. (2006). Kuljettajakeskeinen hakkuukonetyön malli: työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Väitöskirja. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja, 38, 126 s.
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. & Pitkänen, J. 2007. Suomen metsävarat metsäkeskuksittain 2004–2006 ja metsävarojen kehitys 1996–2006. *Metsätieteen aikakauskirja*, 2B/2007: 149–213. Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff07/ff072149.pdf>.
- 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. (toim.). 2001. Harvennuspuun koneelliset korjuuvaihtoehdot. HARKO-projektin (1999–2001) loppuraportti. Työtehoseuran julkaisuja 382.
- 2006. Whole-tree harvesting in young stands in Finland. *Forestry Studies* 45: 118–134. Saatavissa: http://mi.emu.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=262022/Mets_45_12_Karha.pdf.
- 2007. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. *Metsätehon katsaus* 28. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_28.pdf.
- Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. *Metsätehon raportti*, 193. ISSN 1459-773X, 79 s.
- , Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. & Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus -tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. *Metsätehon Raportti*, 211. ISSN 1459-773X, 60 s.
- Laamanen, V. (2004). Hakkuukoneenkuljettajan hiljaisen tiedon näkyväksi tekeminen simulaattorin ja matemaattisten menetelmien avulla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotyötekniikan koulutusohjelma. 69 s.
- Laitila, J. 2008. Harvesting Technology and the Cost of Fuel Chips from Early Thinnings in Finland. *Silva Fennica* 42(2): 267–283. Saatavissa: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf42/sf422267.pdf>.
- 2012. Methodology for choice of harvesting system for energy wood from early thinnings. Doctoral thesis. University of Eastern Finland. *Dissertationes Forestales* 143. 68 s.
- Lindblad, J. 2013. Energiapuun mittauksen kehittäminen –hankkeen loppuraportti. 12 s.
- Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2010a. Energiapuun mittaus. 31 s.
- , Äijälä, O. & Koistinen, A. 2010b. Mätning av energived. 33 s.
- Nisula Forest Oy. 2013. Sähköpostitiedonanto, Ali Nisula, 14.10.2013.
- Nuutinen, Y. 2005. Työntutkijan vaikutus aikatutkimuksen mittaustarkkuuteen hakkuukonesimulaattori-hakkuussa. Joensuun yliopisto. *Metsätieteellinen tiedekunta. Metsä- ja puuteknologian pro gradu*. 45 s.

- 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in time studies on harvester operations. Doctoral thesis. University of Eastern Finland. *Dissertationes Forestales* 156. 68 s.
- Nuutinen, Y., Väätäinen, 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.
- , 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. 2008. Puunkorjuun tehostaminen nuorista metsistä. *Metsätehon katsaus* 36. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_36_1.pdf.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. Doctoral thesis. University of Eastern Finland. *Dissertationes Forestales* 79. 62 s.
- Palander, T., Ovaskainen, H. & Tikkanen, L. 2012. An Adaptive Work Study Method for Identifying the Human Factors that Influence the Performance of a Human-machine System. *Forest Science* 58(4): 377–389.
- Peltola, A. & Ihalainen, A. 2010. Metsävarat. Teoksessa: Peltola, A. (ed.). *Metsätalastollinen vuosikirja 2010*. Metsäntutkimuslaitos: 37–88.
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625–647.
- Purfurst, T. & Erler, J. (2006). The precision of productivity models for the harvester – do we forget the human factor? In: *Precision forestry plantations, Semi-natural and natural forests*. Proceedings of the international precision forestry symposium. Stellenbosch University, South Africa, 5–10 March 2006, 465–475.
- Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. & Smith, C.T. (2000, eds.). *Bioenergy from Sustainable Forestry – Guiding Principles and Practice*, Kluwer Academic Publishers – Forestry Sciences, volume 71. ISBN 1-4020-0676-4.
- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Helsinki. Työteho-seuran julkaisuja 381. 67 s.
- Siipilehto, J. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 33(4): 281–301.
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 694. 179 s.
- Spinelli, R. & Visser, R. 2008. Analyzing and estimating delays in harvester operations. *International Journal of Forest Engineering* 19(1): 36–41.
- Väätäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. & Ala-Fossi, A. (2005). Hakkuukoneenkuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja*, 937. 100 s.