

Kokopuun paalauksen kilpailukyky

Metsäteknologian pro gradu -tutkielma maatalous-
ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten

Helsingin Yliopisto, metsätieteiden laitos

Joulukuu 2013

Tuomas Ala-Varvi

| | | | |
|--|--|--|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty | | Laitos/Institution – Department | |
| Maatalous- ja metsätieteellinen tiedekunta | | Metsätieteiden laitos | |
| Tekijä/Författare – Author | | | |
| Ala-Varvi Tuomas Mikael | | | |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title | | | |
| Kokopuun paalauksen kilpailukyky | | | |
| Oppiaine / Läroämne – Subject | | | |
| Metsäteknologia ja logistiikka | | | |
| Työn laji/Arbetets art – Level | | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages | |
| Pro gradu -tutkielma | | 92 + liitteet 2 sivua | |
| Aika/Datum – Month and year | | | |
| Joulukuu 2013 | | | |
| Tiivistelmä/Referat – Abstract | | | |
| <p>Kansallisessa ilmasto- ja energiastategiassa asetettujen tavoitteiden saavuttaminen edellyttää energiapuun hankintaa nuorista kasvatusmetsistä. Ensiharvennushakkuiden tavoitemäärä on jäänyt saavuttamatta lähes poikkeuksetta joka vuosi viimeisen vuosikymmenen aikana. Ensiharvennusrästien lisääntymisen syynä on ensiharvennusten huono kannattavuus. Metsähakkeeksi korjattavan puun hankinnan laajentaminen ensiharvennusmetsiin merkitsee kasvavia resurssitarpeita. Entistä tehokkaamman tuotantokaluston kehittäminen ja markkinoille saattaminen on tärkeässä roolissa vastattaessa kasvavaan resurssitarpeeseen.</p> <p>Fixteri Oy:n valmistama kokopuupaalain tiivistää korjatun pieniläpimittaisen kokopuun helposti käsiteltäviksi paaleiksi. Tiivistyksellä pyritään alentamaan metsähakkeen tuotantoketjun yksikkökustannuksia ensisijaisesti metsä- ja kaukokuljetuslogistiikkaa tehostamalla.</p> <p>Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella kokopuun paalauksen korjuuketjun tuottavuutta ja pyrkiä selvittämään koko tuotantoketjun kilpailukyky suhteessa karsitun rangan hakkuuseen.</p> <p>Tutkittu koneyksikkö koostui Logman 811FC -alustakoneen takarungolle asennetusta Fixteri FX15a -paalainyksiköstä ja joukkokäsittelevästä Nisulan 280E+ -hakkuulaitteesta. FX15a:n tuottavuus poistuman keskikooalla $37,3 \text{ dm}^3/\text{r}$ oli $9,74 \text{ m}^3/\text{h}_0$. Kuljettaja käytti joukkokäsittelyä tehokkaasti, keskimäärin 3,1 puuta taakassa. Joukkokäsittelyprosentti oli 96 %. FX15a:n tuottavuuden havaittiin olevan karsitun rangan hakkuuta parempi poistuman keskikoon ollessa alle 70 dm^3. Korjuutyö oli kokopuunpaalaimella karsittua rankaa edullisempaa poistuman koon ollessa alle 95 dm^3. Tarkasteltaessa kokopuun paalauksen tuotantoketjun kustannuksia, todettiin kokopuupaalihakkeen käyttöpaikkahinnan (€/m^3) olevan rankahakkeen käyttöpaikkahintaa alhaisempi, kun poistuman keskikoko oli alle 85 dm^3. Olettaessa laskennassa huomioon FX15-seurantakoneen tulokset, ovat edelliset poistuman koot alhaisempia.</p> <p>Tutkittu FX15-seurantakone ei yltänyt uusimman paalainyksikön tuottavuuslukuihin, tuottavuuksien ollessa 5,07 ja $5,86 \text{ m}^3/\text{h}_0$, kun poistuman keskikoot olivat 28,4 ja $41,1 \text{ dm}^3/\text{r}$. Seurantakoneen tuottavuudella laskettuna metsähakkeen käyttöpaikkahinta (€/m^3) oli rankahakkeen käyttöpaikkahintaa korkeampi riippumatta poistuman keskikoosta.</p> <p>Kun huomioidaan kokopuupaalaimen hankintaan mahdollisesti myönnettävä energiatuki, joka on ylimmillään 30 %, ja rankahakkuun ennakkoraivauskustannus, laajenee kokopuun paalauksen potentiaalinen käyttöalue aikaisempaa järeämpipuustoisille kohteille. Kokopuupaalien kuivuminen välivarastossa on tärkeässä roolissa, sillä jos kokopuupaalit eivät kuivu riittävästi varastoinnin aikana, vaarantaa raaka-aineen korkea kosteus koko menetelmän kilpailukykyyn energiantuotannossa suhteessa karsittuun rankaan.</p> <p>Vaikka kokopuun paalaus näyttäisi olevan kilpailukykyinen vaihtoehto pieniläpimittaisen energiapuun hankinnassa, tulisi menetelmää tutkia perusteellisemmin useammilla koneyksiköillä ja kuljettajilla vaihtelevissa korjuulosuhteissa. Lisäksi FX15a konemallia tulisi tarkastella pitkän aikavälin seuranta-aineiston avulla. Myös kokopuupaalien kaukokuljetuksen tehostamista ja paalien ominaisuuksia metsähakkeen raaka-aineena tulisi tutkia lisää.</p> | | | |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords | | | |
| Kokopuun paalaus, Fixteri, energiapuu, tuottavuus, kilpailukyky | | | |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited | | | |
| Viikin tiedekirjasto ja Metsätieteiden laitos | | | |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information | | | |

| | | | |
|---|--|--|--|
| Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry | | Laitos/Institution– Department Forest Sciences | |
| Tekijä/Författare – Author Ala-Varvi Tuomas Mikael | | | |
| Työn nimi / Arbetets titel – Title Competitiveness of whole-tree bundling method | | | |
| Oppiaine /Läroämne – Subject Forest Technology and Logistics | | | |
| Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis | Aika/Datum – Month and year December 2013 | Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 92 pages + attachments 2 pages | |
| Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>To achieve the appointed goals set in the national climate and energy strategy it is important to launch biomass into markets more effectively. In addition to biomass from clearing sites energy wood needs to be procured from young stands. First thinnings have been neglected to great extent in Finland mainly because of low profitability. The targets have been achieved only once during last decade. Expanding energy wood procurement to young stands increases the need for resources. Therefore more effective operating machines should be developed. The challenge is in launching these prototypes into testing and commercial markets.</p> <p>Fixteri Ltd. has developed a whole-tree bundler in order to enhance harvesting of small-diameter energy wood from young stands. This method is meant to reduce transportation costs through load compaction.</p> <p>The aim of this research was to study the productivity of cutting and bundling of whole-trees using Fixteri FX15a bundling unit and to clarify the competitiveness of the whole production chain compared to rival methods. The harvesting was studied trough video analyze in order to detect factors limiting the productivity.</p> <p>35 whole-tree bundles were produced in young Scots pine stand. An average weight and volume of the bundle were 502.5 kg and 463 dm³. It took 3.38 min to produce one bundle. FX15a bundling unit was fitted to Logman 811FC base machine. Accumulating Nisula 280E+ felling head was used. An average performance per effective working hour of 9.74 m³ was recorded when average volume of removal was 37.3 dm³. The operator used multi-tree cutting effectively in average 3.1 whole-trees per work load. The share of multi-tree cutting was 96 percent.</p> <p>The performance of prototype FX15 was significantly lower than the performance of FX15a. The performance of 5.07 and 5.86 m³/h₀ were recorded when average volumes of removed trees were 28.4 and 41.1 dm³.</p> <p>It was observed that the productivity of FX15a was higher compared to the harvesting of undelimited trees when average volume of removed trees was less than 70 dm³. Harvesting and off-road transportation of whole tree bundles was more profitable when average volume of removal was under 95 dm³. Total costs of wood chip supply chain were lower compared to harvesting of undelimited trees when average volume of removal was less than 85 dm³.</p> <p>Total costs of wood chip supply chain were higher compared to harvesting of undelimited trees regardless of average volume of removed trees when FX15 bundling unit was used.</p> <p>When including the possible energy subsidies (max 30 %) for whole-tree bundling and pre-clearance-related additional costs for harvesting of undelimited trees into account the potential number of harvesting sites increases significantly. Drying the bundles plays an important role since high moisture content in the bundles after road side storing may endanger the competitiveness of the whole supply chain when bundles are burned to produce energy.</p> <p>Although bundling whole-trees seems to be a competitive alternative in harvesting small-diameter energy wood there are still several questions unanswered. The method should be studied in greater depth by varying harvesting conditions and machine operators. Also the potential of on-road transport and bundle features needs further study.</p> | | | |
| Avainsanat – Nyckelord – Keywords Whole-tree bundling, Fixteri, energy wood, productivity, competitiveness | | | |
| Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikki campus library, Department of Forest Sciences | | | |
| Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information | | | |

Sisällysluettelo

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Johdanto | 5 |
| 1.1 | EU:n ja Suomen ilmasto- ja energiastrategia | 5 |
| 1.2 | Metsähakkeen käyttöä lisätään | 7 |
| 1.3 | Metsähakkeen saatavuus | 9 |
| 1.4 | Kokopuun paalaus logistiikan tehostamisessa?..... | 12 |
| 1.5 | Tutkimuksen tavoite | 15 |
| 2 | Kokopuupaalaimen kehityspolku ja aikaisempi tutkimus | 15 |
| 2.1 | Fixteri I..... | 15 |
| 2.2 | Fixteri II..... | 18 |
| 2.3 | Fixteri FX15a | 22 |
| 2.4 | Kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetus..... | 23 |
| 2.5 | Kokopuun korjuun ympäristövaikutukset | 26 |
| 3 | Aineisto ja menetelmät | 27 |
| 3.1 | Kokopuun paalaus ja karsitun rangan hakkuu..... | 27 |
| 3.2 | Kokopuupaalien ja karsitun rangan metsäkuljetus | 35 |
| 3.3 | Seuranta-aineisto | 37 |
| 3.4 | Kustannusperusteet..... | 40 |
| 4 | Tulokset | 41 |
| 4.1 | Kokopuun paalaus ja karsitun rangan hakkuu..... | 41 |
| 4.2 | Hakkuun tuottavuus seurantakoneella..... | 52 |
| 4.3 | Kokopuupaalien ja karsitun rangan metsäkuljetus | 55 |
| 5 | Tarkastelu..... | 58 |
| 5.1 | Vertailulaskelmat aikaisempiin tutkimuksiin | 58 |
| 5.2 | Vertailulaskelmat karsitun rangan tuotantoketjuun..... | 59 |
| 5.2.1 | Hakkuu | 59 |
| 5.2.2 | Metsäkuljetus | 61 |
| 5.2.3 | Kaukokuljetus | 62 |
| 5.2.4 | Metsähakkeen tuotantoketju..... | 64 |
| 5.2.5 | Energiatuen ja ennakkoarvauksen vaikutus kustannuksiin..... | 70 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.6 | Uusien painorajojen vaikutus kaukokuljetukseen | 75 |
| 5.3 | Tulosten arviointi | 77 |
| 5.3.1 | Videoanalyysin soveltuvuus tuottavuustutkimukseen | 80 |
| 6 | Johtopäätökset..... | 82 |
| | Lähteet..... | 84 |
| | LIITE 1..... | 93 |
| | LIITE 2..... | 94 |

1 Johdanto

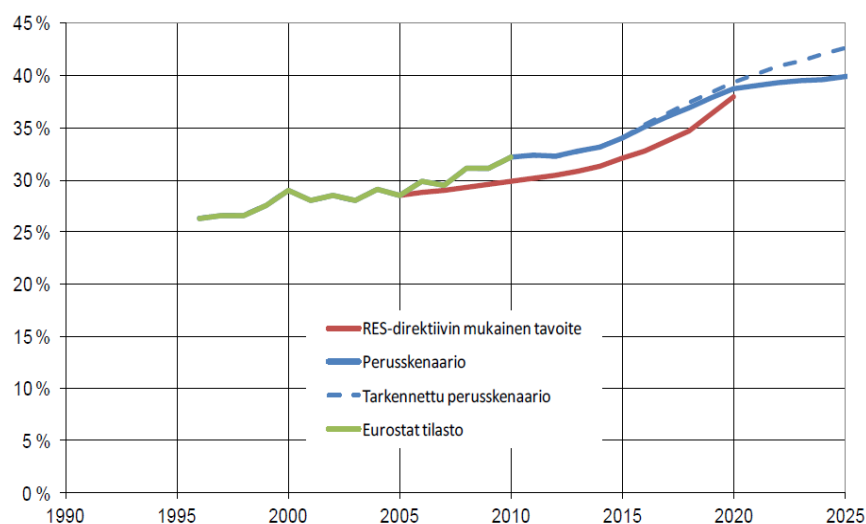
1.1 EU:n ja Suomen ilmasto- ja energiastrategia

Euroopan Unionin ilmasto- ja energiastrategian (Pitkän aikavälin... 2008) linjausten mukaan tavoitteena on laskea EU:n kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % vuoden 1990 tasosta (taulukko 1). Vastaavasti uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukäytöstä EU:n alueella pyritään nostamaan 8,5 prosentista 20 prosenttiin. Jokaiselle EU-maalle on asetettu omat prosentuaaliset tavoitteet. Suomen on määrä nostaa uusiutuvien energialähteiden osuus 28,5 prosentista (2005) 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä (Pitkän aikavälin... 2008) (kuva 1). Puuperäisten polttoaineiden suunniteltu osuus kasvusta on yli puolet (Kansallinen metsäohjelma... 2010).

Taulukko 1. EU:n ja Suomen ilmasto- ja energiastrategiset tavoitteet vuodelle 2020 (Janka 2013)

| | EU | Suomi |
|---|-------|------------------|
| Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen ¹⁾ | -20 % | EU-tason tavoite |
| Päästökauppasektorin päästöt ²⁾ | -21 % | EU-tason tavoite |
| Päästökaupan ulkopuolisen sektorin päästöt ²⁾ | -10 % | -16 % |
| Uusiutuvien energialähteiden osuus energian loppukulutuksesta | 20 % | 38 % |
| Biopolttoaineiden osuus liikenteen polttoaineista | 10 % | 20 % |
| Energiätehokkuuden parantaminen ³⁾ | +20 % | EU-tason tavoite |

¹⁾ vertailuvuosi 1990
²⁾ vertailuvuosi 2005
³⁾ verrattuna vuonna 2007 arvioituun kehitykseen

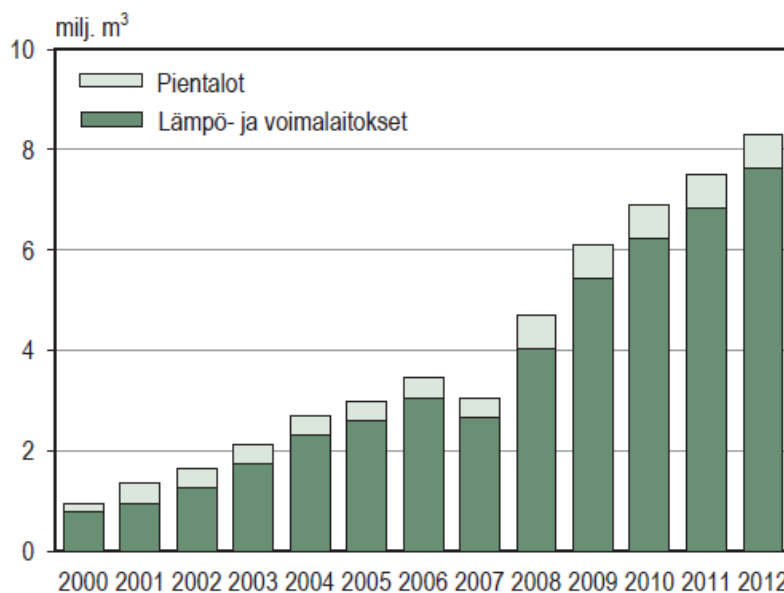


Kuva 1. Suomen uusiutuvan energian kehitys. %-osuus energian loppukulutuksesta (Janka 2013)

Tavoitteiden saavuttamiseksi on kaavailtu jäsenmaiden välisiä joustomekanismeja. Suomi varautuu sille asetettujen tavoitteiden saavuttamiseen ilman kaavailtujen joustomekanismien käyttöä. Tavoitteiden ylittyessä Suomella on mahdollisuus myydä uusiutuvan energian kulutus, direktiivin mukaisella tilastollisella siirrolla, muihin EU-maihin siltä osin, kuin se ylittää suunnitellut rajat (Pitkän aikavälin... 2008).

1.2 Metsähakkeen käyttöä lisätään

Metsäteollisuus on toiminut ja tulee toimimaan uusiutuvien energialähteiden käytön veturina. Suomessa metsäteollisuus tuottaa 70 % uusiutuvasta energiasta (Ohlström 2008). Metsänhoidon ja puunkorjuun yhteydessä syntyy runsaasti puuainesta, joka ei sovellu puunjalostuksen raaka-aineeksi. Korjatusta hakkuutähteestä, pienpuusta, kannoista ja juurakoista voidaan valmistaa metsähaketta. Tavoitteena on lisätä metsähakkeen käyttöä 3,6 miljoonasta kiinto-m³:stä 12 miljoonaan kiinto-m³:iin vuoteen 2020 mennessä (Pitkän aikavälin... 2008). Keväällä 2013 päivitetyn kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaan metsähakkeen käyttö sähkön- ja lämmöntuotannossa tulisi nostaa 25 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä. Tämä vastaa noin 13,5 miljoonaa kiintokuutiometriä metsähaketta (Anttila ym. 2013, Kansallinen energia... 2013, Ylitalo 2013). Vuoteen 2013 mennessä metsähakkeen käytön lisäämisessä on onnistuttu, sillä vuonna 2012 metsähakkeen käytössä saavutettiin uusi ennätys, 8,3 miljoonaa kiintokuutiometriä (Ylitalo 2013) (kuva 2). Tämä vastaa 16,5 TWh:a. Metsähakkeen käytön lisäämisellä pyritään pääosin syrjäyttämään kivihiilen käyttö voimalaitoksissa vuoteen 2025 mennessä (Janka 2013).



Kuva 2. Metsähakkeen käyttö vuosina 2000–2012 (Ylitalo 2013).

Uusiutuvien energialähteiden käytön lisäämisen onnistumisen edellytyksenä on metsäpohjaisen biomassan saaminen markkinoille. Uudistushakkuilta peräisin olevan hakkuutähdepuun lisäksi energiapuuta on hankittava nuorista kasvatusmetsistä. Tämän pieniläpimittaisen puun tuotantokustannuksista suurin osa syntyy metsässä hakkuun yhteydessä (Laitila 2008). Korjattavan puun alhainen laatu, korkeat korjuukustannukset ja pieniläpimittaisen energianpuun korjuuseen suunnattujen koneiden heikko kannattavuus johtavat oikea-aikaisten harvennusten laiminlyönteihin (Jylhä & Laitila 2007). Nämä tekijät hidastavat energiapuun korjuun lisäämistä. Ilman energian hinnan nousua tai korjuun tuottavuustason paranemista puunkorjuu energiakäyttöön nuorista metsistä on kannattavaa ainoastaan valtion tukemana (Laitila 2008). Uusiutuvan energian, erityisesti metsähakkeen, käytön edistämisen taloudellisia ohjaukeinoja ovat tällä hetkellä energiatuki, metsähakkeen muuttuva tuotantotuki ja kestävän metsätalouden rahoituslaki (Kemera) sekä tulevaisuudessa kemera-tuen korvaajana pienpuun energiatuki (PETU).

Energiatuki on suunnattu ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin. Hankkeiden tulee lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä, edistää energiatehokkuutta ja energian säästöä sekä vähentää energiantuotannosta tai -käytöstä aiheutuvia ympäristöhaittoja. Energiatuella pyritään edistämään uusien energiateknologioiden käyttöönottoa ja markkinoille saattamista (Janka 2013). Härmälän (2013) mukaan metsähakkeen muuttuva tuotantotuki on suunnattu metsähaketta käyttäville voimalaitoksille. Tuen suuruus muuttuu päästöoikeuksien ja sähkön markkinahinnan mukaan. Tuen tarkoituksena on parantaa metsähakkeen kilpailukykyä verrattuna turpeeseen. Tuella korvataan metsähakevoimalan korkeammat polttoainekustannukset, kun metsähaketta käytetään turpeen sijasta (Härmälä 2011).

Pienpuun energiatuen (PETU) on ollut määrä astua voimaan jo aikaisemmin, mutta tuella ei ole vielä EU:n komission hyväksyntää. Näin ollen energiapuun korjuuta tuetaan vuoden 2014 loppuun saakka Kemera-tuella (Pienpuun energiatukijärjestelmä... 2013). Maa- ja metsätalousministeriö on linjannut, että

pienpuun energiatukea maksettaisiin 5 € kiintokuutiometriltä, sen jälkeen kun puuera on siirtynyt sähkö- tai lämpölaitoksen omistukseen. Tuen hakijan täytyisi olla energiantuottaja. Lisäksi puuerien tulisi olla peräisin nuoren metsän hoitokohteilta tai ensiharvennuksilta. Suunnitellussa PETU:ssa jäävän puuston keskiläpimittavaatimusta nostettaisiin Kemera:n 16 cm:stä 18 cm:iin (Pienpuun energiatukijärjestelmä... 2013, Suomen säädöskokoelma 2011, Kemera-opas 2007)

Erilaisten biojalostamoiden rakentaminen edistää metsähakkeen käyttöä. Kansallisen energia- ja ilmastostrategian taustaraportin (2013) mukaan Suomeen on suunnitteilla useita suuria biojalostamoita. Biojalostamoiden rakentamista suunnittelevat isot toimijat kuten Vapo Oy, Fortum, Green Fuel Nordic Oy sekä yhteistyössä Gasum Oy, Helsingin Energia ja Metsä Fibre Oy. Näiden laitosten arvioitu yhteenlaskettu metsähakkeen kulutus on n. 5,5 miljoonaa kuutiometriä. Laitosten on määrä valmistua vuoteen 2018 mennessä (Kansallinen energia... 2013). Lehtitietojen mukaan Green Fuel Nordic Oy on jo aloittanut biojalostamon rakennustyöt Iisalmessa. Laitoksen on määrä jalostaa 350 000 kiintokuutiometriä metsähaketta noin 90 000 tonniksi bioöljyä (Biojalostamon rakentaminen... 2013). UPM rakentaa Lappeenrantaan biojalostamon, joka käyttää raakamäntyöljyä liikenteen biodieselin jalostamiseen. Jalostamo tavoittelee 100 000 tonnin vuosituotantoa (UPM rakentaa... 2012).

1.3 Metsähakkeen saatavuus

Asetettujen tavoitteiden saavuttaminen edellyttää kykyä vastata metsähakkeen kasvavan käytön haasteisiin jo lähitulevaisuudessa. Anttilan & Laitilan (2013) mukaan metsähaketta on saatavilla tarpeeksi Suomessa vuoden 2020 tavoitteiden saavuttamiseksi. Metsähakkeen saatavuus ja hinta ovat sidoksissa metsäteollisuuden raakapuun tarpeeseen, energialaitosten maksukykyyn ja metsänomistajien myyntihalukkuuteen (Kärhä ym. 2010). Markkinahakkuiden hidastuessa kannoista ja oksamassasta saatavan metsähakkeen korjuu hankaloituu. Myös polttolaitosten sijainti vaikuttaa hakkeen tuotantokustannuksiin. Mikäli polttolaitokset sijaitsevat

kaukana korjuukohteista, kaukokuljetusmatkat pitenevät ja kuljetuskustannukset nousevat (Anttila & Laitila 2013). 2000-luvulla metsähakkeen käyttöpotentiaalia on tutkittu useasti. Taulukosta 2 ilmenee kahdeksassa eri tutkimuksessa selvitetty potentiaalin koko. Suurimmassa osassa tapauksista potentiaali riittää vuoden 2020 tavoitteiden saavuttamiseksi. Kärhän ym. (2010) selvityksen perusskenaariossa arvioitiin metsähakkeen käyttömahdollisuudeksi 27 TWh vuonna 2020. Tämän toteutumisen arveltiin edellyttävän erittäin suurta panostusta metsähakkeen tuotantoketjuun. Markkinahakkuut ja metsäteollisuuden tuotanto eivät saisi supistua 2000-luvun alun tasosta (Kärhä ym. 2010).

Taulukko 2. Perus-, minimi- ja maksimiskenaariossa laskettu metsähakepotentiaali päästöoikeuksien hinnalla 30 €/CO₂. Lisäksi kuvassa aiemmat 2000-luvulla tehdyt metsähakepotentiaaliselvitykset (Kärhä ym. 2010)

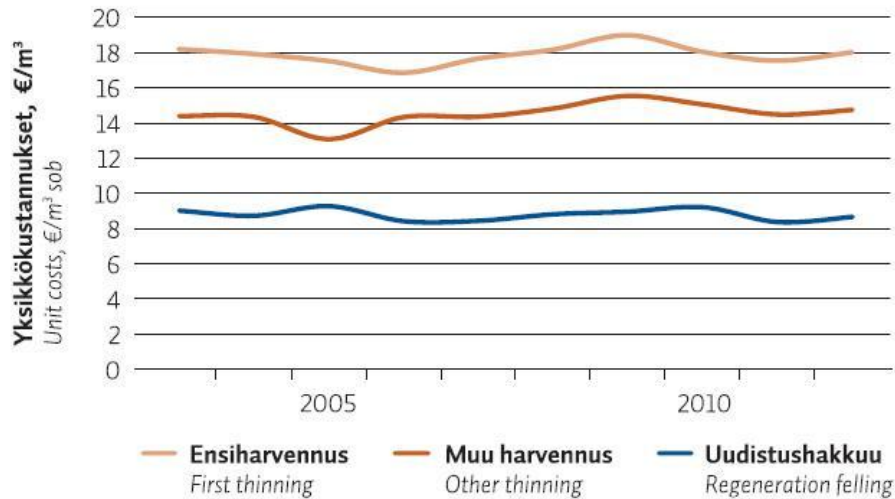
| Tutkimus | Potentiaalin taso | Potentiaalin koko, TWh | |
|---|----------------------|----------------------------------|----------|
| | | Pienpuu + Hakkuutähteet + Kannot | Yhteensä |
| Perusskenaario (30 €/CO ₂) | Teoreettinen | 53,0 * + 26,3 + 25,2 | 104,5 |
| | Teknis-ekologinen | 15,7 + 12,5 + 14,7 | 42,9 |
| | Teknis-taloudellinen | 7,4 + 10,3 + 9,2 | 27,0 |
| Minimiskenaario (30 €/CO ₂) | Teoreettinen | 53,0 * + 23,7 + 22,9 | 99,7 |
| | Teknis-ekologinen | 25,0 + 11,4 + 13,3 | 49,7 |
| | Teknis-taloudellinen | 8,6 + 10,6 + 9,5 | 28,7 |
| Maksimiskenaario (30 €/CO ₂) | Teoreettinen | 53,0 * + 31,5 + 30,3 | 114,8 |
| | Teknis-ekologinen | 15,7 + 15,0 + 17,6 | 48,3 |
| | Teknis-taloudellinen | 6,4 + 12,8 + 10,1 | 29,3 |
| Hakkila 2004 | Teoreettinen | 20,0 + 40,0 + 30,0 | 90,0 |
| | Teknis-ekologinen | - | - |
| | Teknis-taloudellinen | 10,0 + 16,0 + 4,0 | 30,0 |
| Puupolttoaineiden kysyntä... 2005 | Teoreettinen | 17,2 + 16,8 + 17,1 | 51,1 |
| | Teknis-ekologinen | - | - |
| Ranta ym. 2007 | Teknis-taloudellinen | 7,0 + 11,0 + 5,7 | 23,8 |
| Leino ym. 2007 | Teoreettinen | 17,2 + 16,8 + 18,6 | 52,6 |
| | Teknis-ekologinen | - | - |
| | Teknis-taloudellinen | 7,0 + 7,8 + 5,3 | 20,2 |
| Maidell ym. 2008 | Teoreettinen | 25,5 + 16,2 + 13,3 | 55,0 |
| | Teknis-ekologinen | - | - |
| | Teknis-taloudellinen | 12,4 + 6,5 + 4,6 | 23,5 |
| Laitila ym. 2008 | Teoreettinen | - | - |
| | Tekninen | 13,8 + 13,0 + 5,0 | 31,8 |
| | Teknis-taloudellinen | - | - |
| Asplund ym. 2009 | Teoreettinen | - | - |
| | Teknis-ekologinen | - | - |
| | Teknis-taloudellinen | - | 22,0 ** |

*) Perustuu Metsäntutkimuslaitoksen VMI10-aineistoon.

**) Ei raportoitu jakeittain.

Metsähakkeen hankinnan tehostaminen merkitsee kasvavia tuotannon resurssitarpeita. Kärhä ym. (2009) ovat ennustaneet tuotannon resurssien muodostuvan rajoittavaksi tekijäksi metsähakkeen käytön kasvulle. Tuolloin kalusto- ja työvoimatarpeen arvioitiin olevan 3,3–4,0 ja 3,4–4,1-kertaisia (Kärhä ym. 2009). Metsähakkeen käytön kasvaessa saattaa hakkeen raaka-aineesta syntyä alueellista pulaa. Uuden, entistä tehokkaamman tuotantokaluston kehittäminen ja markkinoille saattaminen on tärkeässä roolissa vastattaessa kasvavaan resurssitarpeeseen.

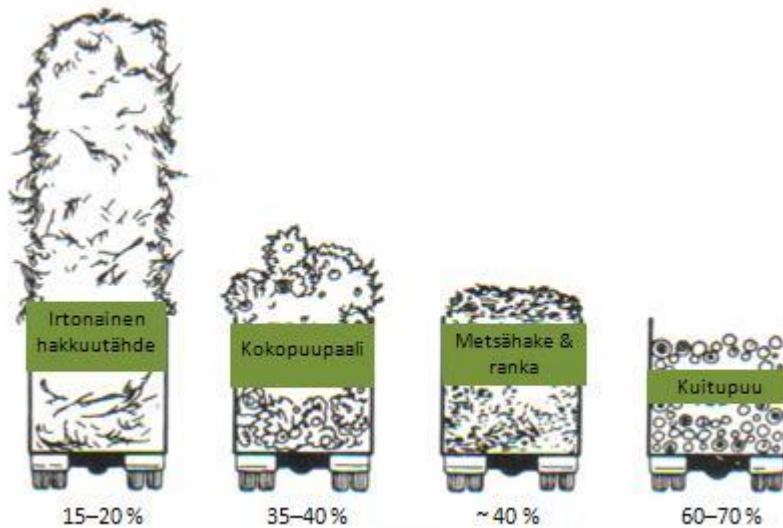
Ensiharvennushakkuiden tavoitemäärät ovat jääneet saavuttamatta lähes poikkeuksetta joka vuosi viimeisen vuosikymmenen aikana. Poikkeuksena vuosi 2008, jolloin ensiharvennuksia tehtiin 255 600 hehtaarilla (Metsätilastollinen vuosikirja 2012). Kansallisessa metsäohjelmassa (2010) on asetettu tavoitteiksi ensiharvennuksille 250 000 ha/vuosi ja nuoren metsän hoidolle 280 000 ha/vuosi. Vuosina 2008–2011 toteutuneet ensiharvennukset ovat olleet keskimäärin vain 194 000 ha/vuosi (Metsätilastollinen vuosikirja 2012). Esitettyjen lukujen perusteella voidaan todeta ensiharvennusrästien lisääntyneen yli 50 000 ha vuositasolla. Osasyynä tavoitteista jäämiseen on ensiharvennusten huono kannattavuus verrattuna myöhempiin harvennuksiin ja uudistushakkuisiin. Ensiharvennushakkuilla puunkorjuun keskikustannus korjattua puukuutiota kohti on yli kaksinkertainen verrattuna uudistushakkuisiin (Strandström 2013) (kuva 3). Metsätilastollisen vuosikirjan (2013) mukaan ensiharvennuksen keskikustannus oli 17,12 euroa kuutiometriltä. Lisäksi energiapuun korjuun heikko korjuujälki on osaltaan rajoittanut energiapuun korjuun suosiota metsänomistajien keskuudessa.



Kuva 3. Koneellisen korjuun yksikkökustannukset 2003–2012 (Strandström 2013).

1.4 Kokopuun paalaus logistiikan tehostamisessa?

Metsähakkeen kasvavien hankintamäärien tuomien haasteiden vuoksi metsähakkeen korjuun tuotantomenetelmien ja teknologian kehitys on avainasemassa. Eräs uudehko tuotantomenetelmä on kokopuun paalaus. Fixteri Oy:n valmistama kokopuupaalain tekee energiapuusta helposti käsiteltäviä paaleja. Tällä pyritään ensisijaisesti metsä- ja kaukokuljetuslogistiikan tehostamiseen. Kokopuun paalausmenetelmä soveltuu ensiharvennuksille ja mahdollistaa aines- ja energiapuun integroidun korjuun. Ainespuu voidaan erotella energiapuusta loppukäyttöpaikalla kuorimarummissa tai vaihtoehtoisesti hakkuun aikana paalataan ainoastaan kuitupuun mitat alittava puuainees. Kokopuun paalauksella pyritään laskemaan korkeita korjuukustannuksia erityisesti energiapuun korjuussa. Pieniläpimittaisen kokopuun paalauksen uskotaan olevan kilpailukykyinen vaihtoehto hakkuutähteiden paalauksen tavoin, varsinkin pitkillä metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla (Kärhä ym. 2009). Kustannussäästöihin pyritään tiivistämällä hakattavaa runkopuuta ja latvusmassaa paaleiksi. Tiivistetyt paalit mahdollistavat suuremmat hyötykuormat metsä- ja kaukokuljetuksessa, sillä kuormattaessa esimerkiksi irtonaista kokopuuta, jää kuormatilaan oksien ja neulasten vuoksi paljon ilmaa (kuva 4).

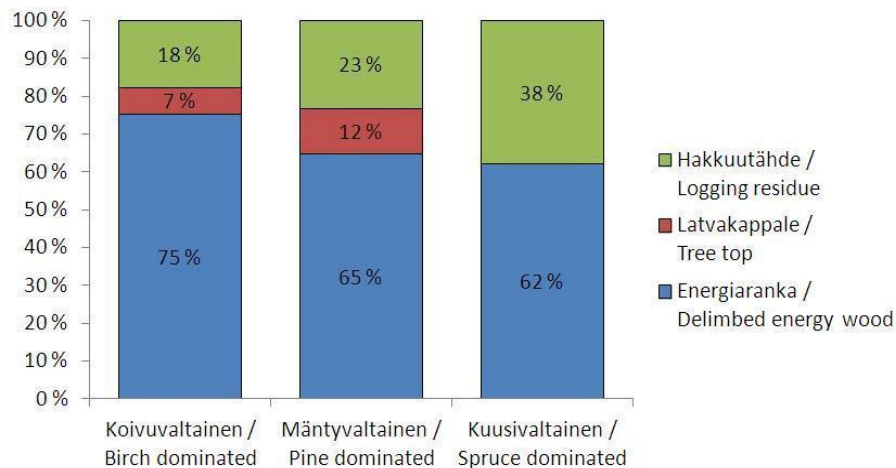


Kuva 4. Eri materiaalien tiivisyysprosentteja. Alkuperäistä kuvaa muokattu. (Jönsson 2007).

Paalaimen syöttörullat rikkovat puun kuoren. Tällöin paalien kuivuminen on mahdollisesti nopeampaa kuin esimerkiksi irtonaisen kokopuun kuivuminen (Erkkilä ym. 2011). Teknologian Tutkimuskeskus (VTT) on tutkinut kokopuun ja kokopuupaalien kuivumista vuonna 2011. Selviä eroja näiden kahden puutavaralajin kuivumiselle ei löydetty. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös syöttörullien puristuspainoiden vaikutusta kuoren irtoamiseen. Tällä ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta. Alkukesästä paalatuissa puissa kuori oli irronnut paalien käärinnässä kohtuullisen hyvin. Erkkilä ym. (2011) arvelivat, että kuivuminen voisi nopeutua selvästi, jos mäntyrungot murskattaisiin lähes rikki paalaamisen aikana. Heidän mukaansa kasojen peittäminen auttaa pitämään molemmat puutavaralajit kuivempina. Erkkilän ym. (2011) tutkimuksessa tulokset perustuvat varsin suppeaan aineistoon, joten ne ovat vain suuntaa antavia.

Kokopuun paalauksessa puita ei lasketa kaadon jälkeen maahan, vaan ne syötetään suoraan paalaimiin. Tämän uskotaan vähentävän metsähakkeen raaka-aineen epäpuhtauksia. Kokopuuta korjattaessa paalataan myös latvusmassa. Tällöin hehtaarikohtainen kertymä on suurempi verrattuna karsitun rangan hakkuuseen, toisaalta samalla viedään pois runsaasti ravinteita sisältävät neulaset (kuva 5). Tämä saattaa aiheuttaa kasvutappioita hakkuun jälkeisinä vuosina, erityisesti ennestään

vähäravinteisilla maapohjilla. Kokopuupaalain voidaan asettaa jättämään halkaisijaltaan 5 cm alittavat rungon osat oksineen pois paaleista, jolloin paalain automaattisesti katkaisee latvat ja pudottaa ne maahan. Tällä lisätoiminnolla voidaan vaikuttaa neulasten, ja sitä kautta ravinteiden poiskulkeutumiseen hakkuualalta.



Kuva 5. Energiapuun ja hakkuutähteiden suhteelliset kertymät pääpuulajin mukaan. Energiaranka on karsittua runkopuuta ja latvakappaleet kuljetuspituuteen katkotun energiarangan yläpuolelle jääviä karsimattomia latvakappaleita. Hakkuutähde sisältää karsitun latvuksen ja hakkuukertymän pienimmät puut joiden rinnankorkeusläpimitta on alle 5 cm (Räisänen 2012).

Talvihakkuissa metsäkuljetus tulisi suorittaa mahdollisimman pian hakkuun jälkeen, ettei lumisade ehtisi peittää hakattuja runkoja. Suurikokoisilla kokopuupaaleilla ei lumeen hautautumisen riski ole välitön ja metsäkuljetus voidaan suorittaa myöhemmin ilman hävikkiä.

Kokopuupaalaimen hankintaan on mahdollista saada energiatukea tällä hetkellä. Tuki perustuu tapauskohtaiseen harkintaan. Tavanomaiselle teknologialle tuen myöntää Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus, kun taas uudelle teknologialle tuen myöntää Työ- ja Elinkeinoministeriö. Tuen enimmäismäärät ovat uudelle teknologialle 40 % ja tavanomaiselle teknologialle 30 %. Tyypilliset tukitasot metsähakkeen ja teollisuuden jättepuuhakkeen tuotantokalustolle ovat 10–20 %.

Fixteri Oy:n mukaan energiainvestointitukea on myönnetty 30 % koskien koko koneyksikköä, ei ainoastaan paalainyksikköä.

1.5 Tutkimuksen tavoite

Tämän tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena oli tarkastella kokopuun paalauksen korjuuketjun tuottavuutta ja selvittää paalatun kokopuun koko toimitusketjun tämänhetkinen kilpailukyky muihin kilpaileviin menetelmiin verrattuna. Aineisto hankittiin keräämällä maastomittausaineisto sekä yhdistelemällä aiempia tutkimuksia kokopuupaalauksen tuottavuudesta. Menetelmää verrattiin karsitun rangan hakkuuseen. Hakkuun ja metsäkuljetuksen yhteydessä kerätyltä videoaineistolta määritettiin työvaiheittaiset ajanmenekit. Videoanalyysin tulosten ja itse videon perusteella pyrittiin selvittämään mahdolliset tuottavuutta rajoittavat tekijät.

2 Kokopuupaalaimen kehityspolku ja aikaisempi tutkimus

2.1 Fixteri I

Kokopuupaalaimesta on tähän mennessä valmistettu useampia kehitysversioita ensimmäisen Fixteri I -prototyypin jälkeen. Kaikki valmistetut paalainyksiköt ovat kehitetty yrittäjän toiveiden ja uusimman teknologisen kehityksen mukaan. Jylhä & Laitila (2007) tutkivat kokopuupaalaimen ensimmäistä prototyyppiä Kangasniemellä helmikuussa 2006. Heidän tutkimuksestaan ovat alla esitetyt koneiden tekniset tiedot ja työnkuvaus. Tuolloin paalainyksikkö oli asennettu Valmet 801 Combi -korjurin takarungolle. Korjurin ohjaamon pyöritettävyyttä oli 540 astetta. Koneen 11 metrin päähän ulottuvaan puomiin oli asennettu joukkokäsittelevä Naarva-Grip 1500-40E-hakkuulaite, jossa katkaisu perustui giljotiiniterään. Hakkuulaitteen syöttöominaisuuden puuttuessa kaadettu puunippu laskettiin maahan ja ote siirrettiin

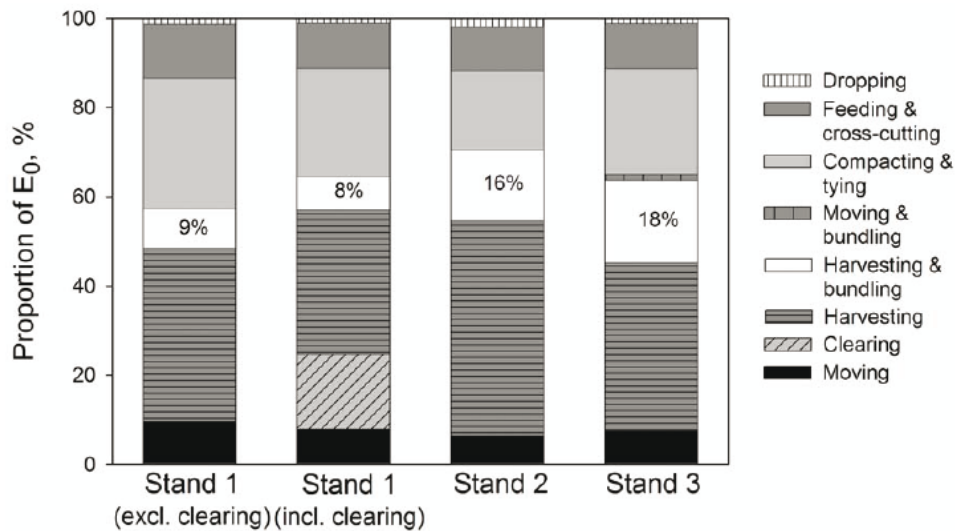
rungossa ylemmäs. Sen jälkeen nippu siirrettiin syöttöpöydälle, josta se vedettiin syöttörullilla syöttöyksikön kautta paalaimen. Puunippu katkaistiin 2,6 metrin pituuteen ketjusahalla. Syöttöä täytyi avustaa puomilla. Tämän jälkeen hakkuulaitteella voitiin jatkaa puiden keräilyä. Paalainyksikön kammiossa olevat sensorit havaitsivat, kun haluttu puumäärä kammiossa saavutettiin, minkä jälkeen nippu nostettiin sidontakammioon. Sidontakammiossa nippu sidottiin sisal-narulla neljästä kohdasta paaliksi. Valmis paali pudotettiin ajouran vasemmalle puolelle. Paalin ollessa yläkammiossa sidottavana, uutta puuta syötettiin samanaikaisesti syöttöyksikköön seuraavan paalin raaka-aineeksi. Tehtäessä useampaa paalilajia (energiapuupaali, kuitupuupaali) puita jouduttiin lajittelemaan maassa ennen paalaimen syöttöä (Jylhä & Laitila 2007).

Aikatutkimuksessa Jylhä & Laitila (2007) käyttivät kahta työntutkijaa, jotka kellottivat työvaiheiden ajanmenekit. Erityisesti työvaiheiden yhtäaikaaisuuteen kiinnitettiin huomiota. Tutkimushetkellä maastossa oli lunta 40 cm ja lämpötila vaihteli nolasta viiteen pakkasastetta. Koneenkuljettajalla oli kahden vuoden kokemus puunkorjuusta ja kolmen kuukauden kokemus kokopuun paalauksesta (Jylhä & Laitila 2007).

Paaleja tehtiin yhteensä 45 kappaletta. Paalit olivat keskimäärin 256 cm pitkiä. Kuitu- ja energiapuupaalit painoivat keskimäärin 453 kg ja 325 kg. Keskimääräinen kuitupuupaali koostui 0,4 m³ kuitupuusta ja 0,1 m³ energiapuusta (Jylhä & Laitila 2007).

Jylhän ja Laitilan (2007) mukaan työvaiheiden samanaikaisuus oli vähäistä, vain 8–18 % tehoajasta. Hydrauliiikan tehottomuuden vuoksi puiden keräilyä ja kaatoa ei pystytty limittämään paalauksen työvaiheiden kanssa. Erityisesti pitkät puut veivät kuljettajan huomion kokonaan, koska paalainyksikön syöttöä täytyi avustaa. Paalainyksikön kääntyvyys mahdollisti puiden syöttämisen koneen molemmilta puolin, mutta syöttö täytyi suorittaa loppuun ennen paalaimen kääntöä. Yhtäaikainen liikkuminen ja paalaaminen olivat mahdollista vain paalin sidontavaiheessa. Puita

yhdessä taakassa oli keskimäärin 1,09, 1,56 ja 1,16 kolmella koealalla. Joukkokäsittelyprosentti oli siis varsin alhainen ja vaihteli välillä 8–36 %. Poistuman keskimääräiset runkojen tilavuudet kolmella koealalla olivat 34, 40 ja 31 dm³. Paalauksen työvaiheet jaettiin kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Koko prosessin tehoajan jakautuminen työvaiheisiin koealoilla 1–3. Koealalla yksi raivauksen vaikutus poistettu ensimmäisestä palkista. (Jylhä & Laitila 2007).

Kokopuun paalauksen tuottavuus oli tutkimuksessa 2,6–3,7 m³ tehotunnissa (Jylhä & Laitila 2007). Tuolloin menetelmän tuottavuus ei ollut kilpailukykyinen perinteisellä harvesterilla tehtyyn kokopuun korjuuseen, jonka tuottavuus, rungon koon ollessa 30–40 dm³, oli noin 8–10 m³ tehotunnissa (Kärhä ym. 2006b). Kokopuupaalaimen kuljettajan työskentely arvioitiin raskaaksi useiden päällekkäisten työvaiheiden vuoksi (Jylhä & Laitila 2007). Kärhä ym. (2007) selvitti mikä kokopuupaalaimen tuottavuuden tulisi olla, että menetelmä olisi kilpailukykyinen kilpaileviin menetelmiin nähden (taulukko 3).

Taulukko 3. Kokopuun paalauksen minimituottavuudet menetelmän kilpailukyvyyn saavuttamiseksi poistuman rinnankorkeusläpimitan ja kokopuurungon tilavuuden suhteen (Kärhä ym. 2007).

| | Rinnankorkeusläpimitta, cm | | | | | |
|--|---|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 |
| | Kokopuurungon koko, dm ³ | | | | | |
| | 8 | 19 | 36 | 60 | 94 | 137 |
| | Tuottavuus, m ³ /tehotunti (paalia/tehotunti *) | | | | | |
| Kokopuupaalaimen tuottavuuden oltava yli | 2,9 (5,9) | 4,6 (9,2) | 6,2 (12,4) | 7,6 (15,1) | 8,7 (17,4) | 9,5 (19,0) |

*) Oletettu, että paalin koko on 0,5 m³.

2.2 Fixteri II

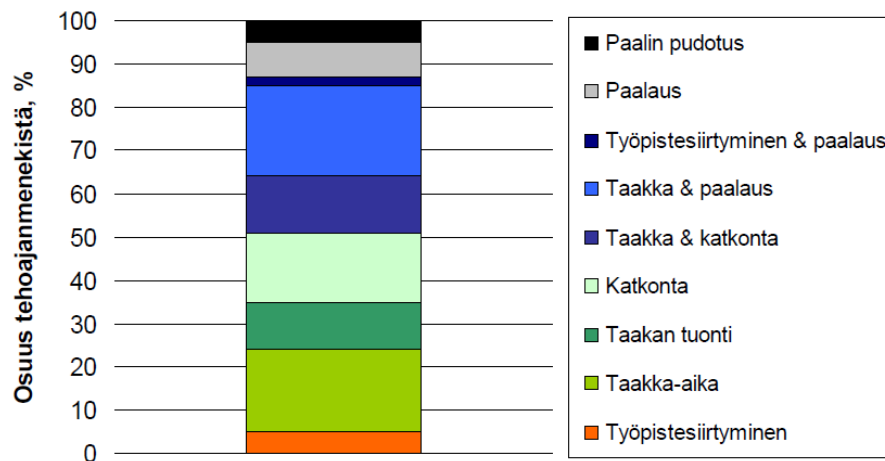
Fixteri-kokopuupaalaimen toista kehitysversiota on tutkittu vuosina 2008–2009 Kangasniemellä Metsäteho Oy:n ja Metsäntutkimuslaitoksen toimesta. Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa pyrittiin rakentamaan tuottavuusperusteet kokopuun paalaukseen ja kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetukseen. Tavoitteena oli myös selvittää kokopuupaalien ominaisuudet ja niiden yhteys tuottavuuteen. Lisäksi pyrittiin määrittämään kustannukset kokopuun paalauksen tuotantoketjulle ja vertaamaan niitä muiden aines- ja energiapuun hankintaketjujen tuotantokustannuksiin. Tutkimuksessa selvitettiin myös kokopuun paalauksen optimaalista käyttöaluetta.

Fixteri II -kokopuupaalaimen alustakoneena oli tuolloin, kuten edelliselläkin prototyypillä, Valmet 801 Combi -korjuri. Komatsu Forest AB ilmoitti alustakoneen moottoritehon olleen 140 kW. Cranab CRC 15 -kuormaimen ulottuvuus oli 11 m. Paalainyksikön paino oli arviolta 5,5 tn. Paalaimen ulkomitat olivat: pituus 4000 mm, leveys 1950 mm ja korkeus 2700 mm. Näin ollen koko koneyhdistelmän pituus oli 9,35 m kokonaispainon ollessa n. 30 tn. Tutkimuskoneessa oleva hakkuulaite oli Fixteri Oy:n valmistama sykesyöttöinen, joukkokäsittelyvä Fixteri-hakkuulaite. Hakkuulaitteessa rungon katkaisu perustui kiinteään giljotiiniterään ja hakkuulaite painoi arviolta 700 kg (Kärhä ym. 2009).

Hakkuun ja puiden keruun jälkeen puunippu syötettiin syöttöpöydällä sijaitseville syöttörullille, jotka vetivät puunipun syöttökammioon. Ensimmäisen prototyypin tapaan paalainyksikössä oli kiinteästi asennettuna ketjusaha, joka katkaisi puunipun 2,7 m pituuteen. Syötettyään riittävästi puuta paalaimen välikammioon, puunippu nostettiin ylös puristuskammioon, jossa se tiivistettiin ja sidottiin sisäl-narulla. Lopuksi valmis paali pudotettiin ajouran vasemmalle puolelle (Kärhä ym. 2009).

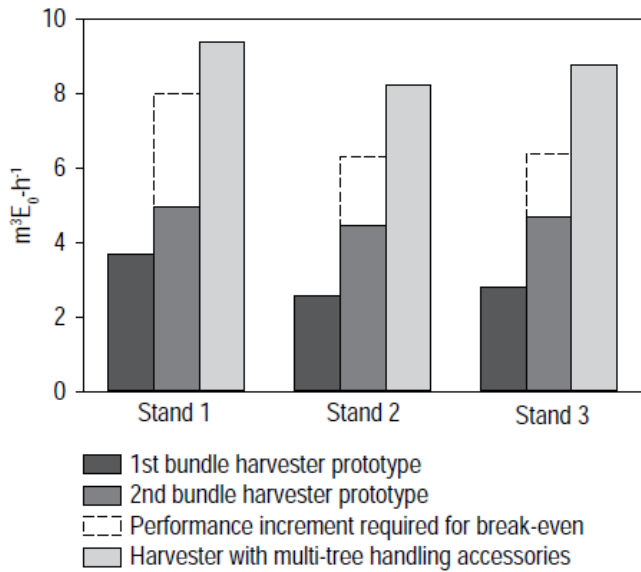
Kokopuupaalin kiintotilavuus oli keskimäärin 495 dm³. Paalit punnittiin metsäkuljetuksen yhteydessä kuormainvaa'alla. Paalit painoivat keskimäärin 476 kg ja niiden läpimitta sekä pituus olivat 65 ja 268 cm. Osa paaleista mitattiin upottamalla ne veteen. Näiden paalien keskimääräinen tuoremassa ennen upotusta oli 448 kg. Vastaava tulos kuormainvaakamittauksen perusteella oli 450 kg/paali. Poistuman keskitilavuus oli 40 dm³ kokopuuta. Koneen kuljettajalla oli lähes neljän vuoden kokemus kokopuun paalauksesta ja yhteensä kahdeksan vuoden kokemus puunkorjuusta.

Kuten aiemmassakin Jylhän & Laitilan (2007) tutkimuksessa niin myös tässä Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa käytettiin kahta työntutkijaa. Työvaiheiden limittyessä etusijalla olivat hakkuutyöhön liittyvien työvaiheiden ajanmenekkien tallentaminen. (Kärhä ym. 2009). Tutkimuksessa käytetty työvaihejaottelu ja tehoajan jakautuminen: työpistesiiirtyminen 5 %, taakka-aika (hakkuu ja puiden keruu) 19 %, taakan tuonti paalaimelle 11 %, katkonta/sahaus 16 %, samanaikainen taakka- & katkonta-aika 13 %, samanaikainen taakka- & paalaus aika 21 %, samanaikainen työpistesiiirtyminen & paalaus 2 %, paalaus 8 %, paalin pudotus 5 %, raivaus, keskeytys 0 % (Kärhä ym. 2009)(kuva 7).

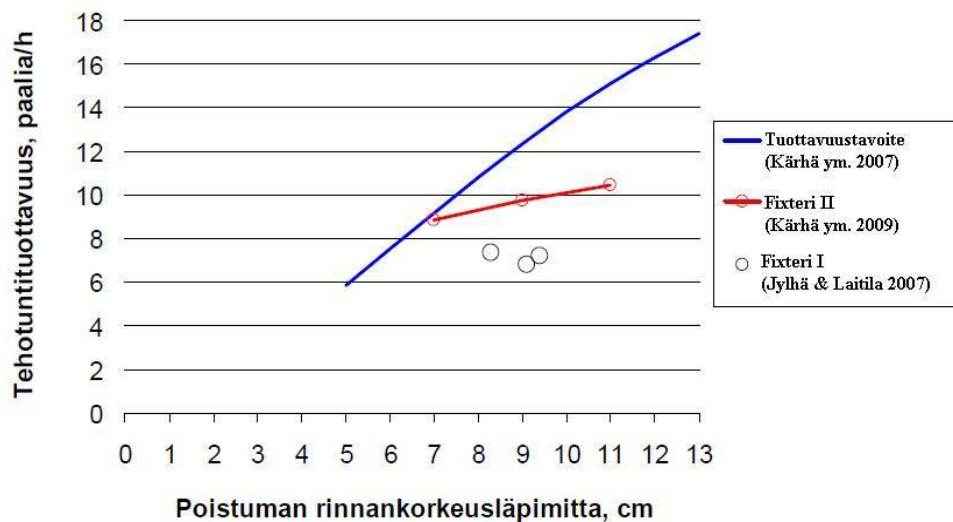


Kuva 7. Tehoajan jakautuminen työvaiheisiin (Kärhä ym. 2009).

Kokopuun paalauksen tuottavuus oli 3,6–7,0 m³/h₀. Paalauksen ajanmenekkimalleissa käytettiin tuoretiheyslukua 910 kg/m³ ja tuottavuusfunktiot perustuivat työtapaan, jossa hakattiin vain yhtä kokopuupaalilajia. Keskimääräinen joukkokäsittelyprosentti oli 80 ja taakkakoko keskimäärin 2,9 puuta/taakka. Samanaikaisten työvaiheiden osuus tehoajasta oli keskimäärin 35 %. Kärhän ym. (2009) mukaan työvaiheiden samanaikaisuuden lisäämisen todettiin nostavan tuottavuutta. Tutkimuksessa todettiin tuotantoketjun olevan sitä kilpailukykyisempi mitä pienempi poistuman runkokoko on. Optimaalinen käyttöalue määritettiin olevan ensiharvennuksilla, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7–10 cm (Kärhä ym. 2009). Kokopuupaalaimen käyttötuntikustannukseksi määriteltiin 107 € koneyhdistelmän hankintahinnan ollessa 550 000€ (alv. 0 %). Kuvissa 8 ja 9 esitetään kokopuun paalauksen tuottavuuksia Kärhän ym. (2009) ja Jylhän & Laitilan (2007) tutkimuksissa sekä Kärhän ym. (2007) määrittelemä kilpailukykyinen tuottavuustaso.



Kuva 8. Fixteri I & II tuottavuudet. Lisäksi joukkokäsittelylaitteella varustetun keskikokoisen harvesterin tuottavuus sekä tuottavuuden vähimmäistaso, jolla kokopuupaalain olisi kilpailukykyinen verrattuna irtonaisen kokopuun hakkuuseen (Jylhä 2011).



Kuva 9. Fixteri I & II tuottavuudet suhteutettuna poistuman kokoon (Kärhä ym. 2009). Alkuperäistä kuvaa muokattu selitteiden osalta vastaamaan tämän tutkimuksen lähdeluetteloa.

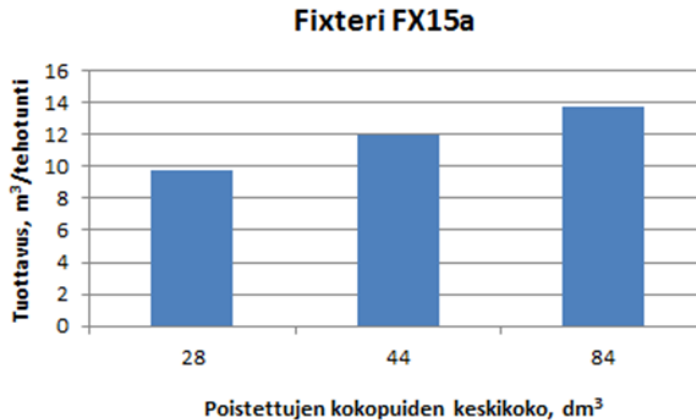
Tutkimuksessa todettiin Fixteri II -paalaimen tuottavuuden parantuneen huomattavasti verrattuna paalaimen ensimmäiseen prototyypiversioon. Tuottavuuden kasvu ei tutkimuksen mukaan vielä riittänyt takaamaan kokopuun

paalauksen kilpailukykyä pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun korjuussa (Kärhä ym. 2009).

2.3 *Fixteri FX15a*

Vuonna 2013 Metsäntutkimuslaitos yhteistyössä Skogforskin kanssa selvitti Fixterin uusimman mallin FX15a:n tuottavuutta Uuraisilla. Uusimman paalaimen tuottavuuden todettiin nousseen jopa yli kaksinkertaiseksi edelliseen malliin verrattuna (Nuutinen & Björheden 2013). Kolmannessa tutkitussa Fixteri-kokopuupaalaimessa oli alustakoneena Logman 811FC ja Fixteri FX15a-paalainyksikkö. Alustakone oli varustettu joukkokäsittelevällä Nisulan 280E+-hakkuulaitteella. Hakkuulaitteessa ei ollut syöttömahdollisuutta, joten ote puunipun tyveltä jouduttiin siirtämään ylemmäs nipussa, hieman puristusta laskemalla ja siirtämällä hakkuulaitetta kohti puunipun latvaa.

Nuutinen ja Björheden (2013) totesivat kokopuupaalaimen tuottavuuden nousseen Fixteri II -kokopuupaalaimesta 1,9–2,6-kertaiseksi. Tuottavuus vaihteli suhteessa poistettavien puiden kokoon ja määrään. Poistuman runkojen keskikoon ja tiheyden ollessa 28 (3213), 44 (2016) ja 84 dm³ (1266 r/ha) olivat tehotuntituotokset 9,7, 11,9 ja 13,8 m³ (Nuutinen & Björheden 2013) (kuva 10). Tuottavuuden merkittävää nousua perusteltiin paalainyksikön tehokkuuden paranemisella sekä hakkuulaitteen tehokkaammalla joukkokäsittelyllä.



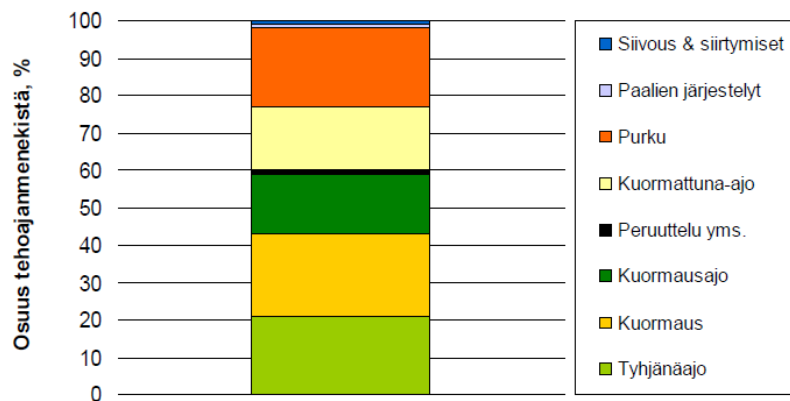
Kuva 10. Fixteri FX15a:n tuottavuus poistuman keskitilavuuden mukaan (Nuutinen & Björheden 2013).

2.4 Kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetus

Metsäteho Oy on tutkinut Fixteri I -kokopuupaalaimella valmistettujen paalien metsäkuljetusta yhdessä paalauksen ja kaukokuljetuksen kanssa Kangasniemellä 2008 (Kärhä ym. 2009). Tutkimuksen 6-pyöräisessä Timberjack 1010B -kuormatraktorissa oli ulottuvuudeltaan 8,5 m Loglift 61 -kuormain ja Loglift 25 -puutavarakoura. Kaksi peräkkäistä kokopuupaalinippua vetävän kuormatilan pituus ja leveys olivat 4,6 ja 2,56 m. Kuormatraktorin kuljettajalla oli 2,5 vuoden kokemus kokopuupaalien metsäkuljetuksesta ja yhteensä 4,5 vuoden kokemus puutavaran metsäkuljetuksesta (Kärhä ym. 2009).

Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa paaleja ajettiin tienvarsivarastolle 50 kokopuupaalikuormaa, yhteensä 1113 kokopuupaalia. Metsäkuljetuksen tehoaika oli jaettu seuraaviin työvaiheisiin: tyhjänäajo, kuormaus, kuormausajo, peruuttaminen/kääntyminen yms. palstalla, kuormattuna ajo, purku, kuorman järjestely ja paalien lajittelu, varastolla siirtyminen kuorman purkamisen aikana sekä varastopaikan siistiminen. Kuormat punnittiin Evocar 2000 -pyöräpainovaaioilla ja paalien lukumäärä kuormissa laskettiin. Tyhjänä-, kuormattuna- ja kuormausajomatkat mitattiin lankamittalaitteella. Keskimääräiset tyhjänä- ja kuormattuna-ajomatkat olivat 342 ja 235 m (Kärhä ym. 2009).

Kuormauksen ja kuorman purkamisen osuudet tehoajasta olivat 22 ja 21 %. Yhteensä kuorman purkamiseen liittyvien työvaiheiden ajanmenekki oli 23 %. Kuormausajon ja peruuttelun osuus oli 16 ja 1 %. Kuormatraktoria ajettiin tyhjänä 21 % ja kuormattuna 17 % tehoajasta (kuva 11) (Kärhä ym. 2009).



Kuva 11. Metsäkuljetuksen tehoajan prosentuaalinen jakautuminen eri työvaiheisiin (Kärhä ym. 2009).

Keskimääräinen kuormakoko oli 22,3 kokopuupaalia paalin tilavuuden ollessa keskimäärin 0,5 m³. Tehotuntituotos puolen kuution paalikoolla ja 300 m metsäkuljetusmatkalla oli 23,8 m³. Kuormakoon paalimäärän tai paalin tilavuuden muutoksilla oli merkittävä vaikutus kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuteen (taulukko 4) (Kärhä ym. 2009).

Taulukko 4. Kuormakoon ja paalin tilavuuksien muutosten vaikutus metsäkuljetuksen tuottavuuteen (Kärhä ym. 2009).

| Kuormakoon muutos (paalia) | Tuottavuuden muutos (m ³ /tehotunti) | Paalin tilavuuden muutos (m ³) | Tuottavuuden muutos (m ³ /tehotunti) |
|----------------------------|---|--|---|
| -7 | -4 | -0,1 | -4,8 |
| 7 | 2,8 | 0,1 | 4,8 |

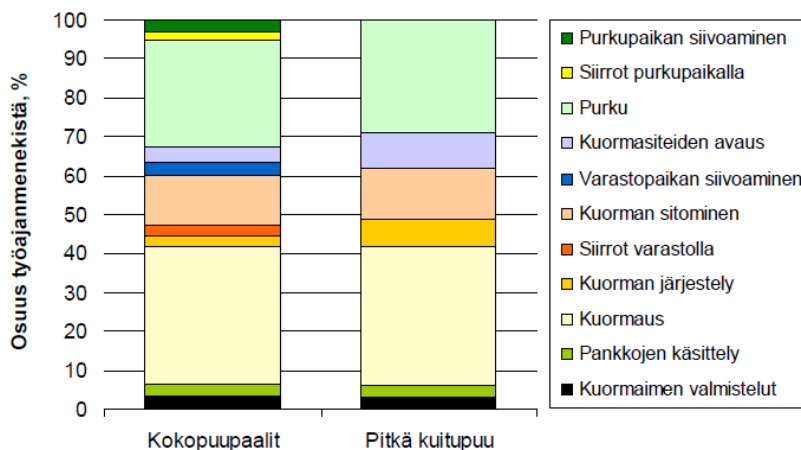
Metsäkuljetusmatka 300m

Kokopuiden tiivistämisen edut olivat selvät kokopuupaalien metsäkuljetuksessa. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus oli noin kaksinkertainen verrattuna

perinteisen kuitupuun ja kokopuun metsäkuljetukseen (Laitila ym. 2009, Kärhä ym. 2009).

Kärhä ym. (2009) ovat tutkineet myös kokopuupaalien kaukokuljetusta ja verranneet sitä pitkän kuitupuun (5 m) kaukokuljetukseen. Tutkimuksessa kuljetettiin yhteensä 324 paalia ja yksi (37,9 m³) autokuorma mäntykuitupuuta. Puutavara-auto oli Volvo FH 16, joka oli varustettu 9,6 metriä ulottuvalla Jonsered 1020 -autonosturilla. Kolmeakseliseen vetoautoon kuormattiin 2 kokopuupaalinippua ja neliakseliseen perävaunuun 3 kokopuupaalinippua.

Teho aika jakautui työvaiheisiin seuraavalla tavalla (kuva 12): kuormaus 36 %, purku 27 %, kuorman sitominen 13 %, kuormasiteiden avaaminen 4–9 %, kuormauspaikan siivoaminen ja kuorman siistiminen 4 % ja purkupaikan siivoaminen 3 %, kuormaimen valmistelu 3–4 %, pankkojen käsittely 3 %, kuorman järjestely 2–7 %, siirrot varastolla 5 %.



Kuva 12. Kokopuupaalien ja pitkän (5 m) kuitupuun kaukokuljetuksen kuormauksen ja purkamisen tehoajan jakautuminen työvaiheisiin (Kärhä ym. 2009).

Autokuorman kooksi oletettiin 90 (35,1 m³) paalia ja paalin keskitilavuudeksi 0,39 m³. Pitkällä mäntykuitupuulla autokuorman koko oli 37,9 m³. Taulukossa 5 on vertailtu kokopuupaalien ja pitkän kuitupuun kaukokuljetuksen ajanmenekkejä.

Kuitupuun kuormaus ja purku onnistui ilman puutavara-auton siirtoa, toisin kuin kokopuupaaleja käsiteltäessä (Kärhä ym. 2009).

Taulukko 5. Tehoajan jakautuminen kuormauksen ja purkamisen työvaiheisiin kokopuupaalien ja pitkän mäntykuitupuun (5m) kaukokuljetuksessa

| Työvaihe | Kokopuupaalit (35,1 m ³ ; 90 paalia) | Pitkä mäntykuitupuun (37,9 m ³) |
|-------------------------------------|--|--|
| | Tehoajanmenekki, s/kuorma | |
| Kuormaimen valmistelut | 134 | 83 |
| Pankkojen käsittely | 112 | 84 |
| Kuormaus | 1 464 | 969 |
| Kuorman järjestely | 90 | 192 |
| Siirrot varastolla ja purkupaikalla | 196 | 0 |
| Kuorman sitominen ja avaus | 626 | 593 |
| Purkaminen | 1 125 | 803 |
| Siivous | 238 | 0 |
| Yhteensä | 3 985 | 2 724 |

2.5 Kokopuun korjuun ympäristövaikutukset

Lisääntyvä biomassan korjuu metsistä voi nopeuttaa ravinteiden menetystä metsämaasta (Hakkila 2005). Kivennäismailla puuston kasvua eniten rajoittava tekijä on typen saanti. Häiriöttömän kasvun edellytyksenä on, että kaikkia tarvittavia ravinteita on saatavilla sopiva määrä (Kuusinen & Ilvesniemi 2008). Typpeä tulee metsämaahan laskeutuneena ja typen biologisena sidontana. Typpi saattaa varastoitua puuaineeseen hyvinkin pitkäksi aikaa. Osa puun sitomasta typestä vapautuu kiertoon karikkeena vuosittain. Oksat ja neulaset sisältävät puuston typpivaroista suuren osan (Kuusinen & Ilvesniemi 2008). Kokopuun korjuussa kerätään myös elävä oksa- ja neulasmassa talteen lähes kokonaisuudessaan. Näin ollen ravinnemenetys kokopuunkorjuussa on huomattavasti suurempi verrattuna ainespuunkorjuuseen. Korjattaessa kokopuuta ravinteiden määrä vähenee metsämaassa n. 50–150 % enemmän verrattuna ainespuun korjuuseen (Hakkila 2005). Tämä saattaa aiheuttaa puiden kasvun taantumista (Kuusinen & Ilvesniemi 2008). Heikkilän ym. (2010) tutkimuksessa todettiin, että hakattaessa karsittua rankaa, jäi metsään hakkuutähteisiin sitoutunutta typpeä 27 kg/ha enemmän kuin kokopuun hakkuussa. Jacobsonin & Kukkolan (1999) tutkimuksessa kymmenessä vuodessa puuston kasvu

väheni kokopuun korjuun vaikutuksesta kuusikossa 12 % ja männikössä 7 % verrattuna runkopuun korjuuseen.

Ainespuuhakkuussa latvusmassaa on perinteisesti prosessoitu ajouralle vahvistamaan maaperän kantavuutta ja vähentämään korjuuvaurioita. Kokopuunkorjuussa näin ei voida tehdä, jolloin rasitus maaperään kasvaa. Tällöin myös riski juurikäävän leviämislle nousee. Etenkin juurikäävän riskialueilla tulisi energiapuunkorjuussa kiinnittää huomiota kantokäsittelyyn. Nykyisissä giljotiinikatkaisuun perustuvissa hakkuulaitteissa ei kantokäsittelymahdollisuutta vielä ole. Energiapuun ja etenkin kokopuun korjuun ympäristövaikutuksista ei ole vielä riittävästi tutkimustietoa. Luotettavan tiedon saaminen energiapuun korjuun vaikutuksista, esimerkiksi puuston kasvuun, edellyttää pitkän aikavälin seurantakokeita. Energiapuun käyttö on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana niin nopeasti, ettei tällaisten seurantakokeiden tuloksia ole vielä saatavilla.

3 Aineisto ja menetelmät

3.1 Kokopuun paalaus ja karsitun rangan hakkuu

Tämän tutkimuksen maastomittausaineisto kerättiin touko-kesäkuussa 2013 Uraisilla ja Loviisassa. Uraisilla mittaukset suoritettiin kahdella kuviolla (kuva 13 ja 14). Kummankin kuvion pinta-ala oli n. 0,5 ha. Molemmilta koealoilta puustotunnukset mitattiin ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen, ennen metsäkuljetusta. Molempien kuvioiden puusto oli lähes yksinomaan mäntyä ja kuviot sijaitsivat kokonaan kivennäismaalla.

Puuston ennakkomittauksissa kirjattiin ylös puulaji, puun pituus, rinnankorkeusläpimitta, kantoläpimitta, pohjapinta-ala, puuston tiheys sekä elävän latvuksen alaraja. Ympyräkoealat sijoitettiin kuvioille satunnaisesti. Koealojen säde oli 1,78 m. Hakkuun jälkeen systemaattisesti sijoitetuilta yhdeksältä koealalta mitattiin ajouraleveydet ja ajouravälit. Koalat sijoitettiin systemaattisesti siten, että ne jakautuivat tasaisesti ajouralle, 4 m ja 7 m ajouralta sivuun. Hakkuun jälkeisissä puustotunnusten mittauksissa kirjattiin pystypuilta rinnankorkeusläpimitta, kantoläpimitta, pituus ja puulaji. Kannoista kirjattiin kantoläpimitta ja puulaji. Kaikilta koealoilta mitattiin lisäksi puuston tiheys ja pohjapinta-ala. Molemmilta tutkimuskuvioilta mitattiin kaikki korjuuvauriot hakkuun päätteeksi, ennen metsäkuljetusta. Maastotarkastuksessa laskettiin vaurioiden lukumäärä. Jokaiselle vauriolle määritettiin sijainti (runko, juuri), koko (cm²), tyyppi (kuori rikkoontunut, puuaine rikkoontunut) sekä vaurion oletettu aiheuttaja (puomi, rengas, paali, paalainyksikkö, taakka). Vaurioiden lisäksi mitattiin ajouran leveys ja ajourien väli. Hakkuun jälkeisissä mittauksissa koealan säde oli 3,99 m. Myös ajouraston kokonaispituus mitattiin.

Puustotunnukset laskettiin ennako- ja jälkimittausten perusteella käyttäen Metsäteho Oy:n massan, tilavuuden ja energiasisällön laskentamallia kuorelliselle runkopuulle ja elävälle latvukselle. Laskentamalli käytti Näslundin (1936) pituuskäyrämallia, Laasasenahon (1982) runkokäyrämallia ja Hakkilan (1991) latvusmassamallia sekä Poikelan (1996) latvusmassan pituussuuntaisen jakauman mallia.



Kuva 13. Fixteri FX15a:n tutkimuskuvio Uuraisilla ennen hakkuuta.



Kuva 14. John Deere 1070D:n tutkimuskuvio Uuraisilla ennen hakkuuta.

Koealat hakattiin siten, että Fixteri FX15a hakkasi ensimmäisen koealan tehden kokopuupaaleja ja John Deere 1070D hakkasi toisen koealan, tehden karsittua rankaa joukkokäsittellen. Tutkimuksessa hakattiin ainoastaan energiapuuta. Koealat

sijaitsivat vierekkäin, koska koneet työskentelivät yhtäaikaaisesti. Ennen hakkuun aloittamista kuljettajat ohjeistettiin toimimaan normaalin työrutiinin mukaisesti. Kumpainenkin kone hakkasi omaa kuviotaan, kunnes kuvio oli hakattu kokonaan. Varastopaikkojen hakkuu jätettiin tarkastelun ulkopuolelle ja varastopaikat hakattiin omana eränään muun hakkuun päätyttyä. Näin pyrittiin maksimoimaan tutkimuksessa hakattava pinta-ala. Fixterin kuljettajalla oli pitkä kokemus hakkuukonetyöskentelystä ja kokopuun paalauksesta. Hän operoi kokopuupaalainta päivittäin omilla toimeksiannoillaan ja oli työskennellyt Fixteri III -koneyksikön kuljettajana n. 2,5 vuotta. Fixteri III -konemalli ei ole automatisoitu ja siinä pituusmittakatkonta tapahtuu ketjusahalla. FX15a testikoneesta kuljettajalla oli takanaan lyhyt, kolmen viikon totuttelujakso ennen tätä tutkimusta. Kuljettaja oli sama kuin Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa. Harvesterin kuljettaja oli kokenut, ja karsitun rangan hakkuu oli hänelle tuttu menetelmä.

Paalainyksikkö oli asennettu Logman 811FC -alustakoneen takarungon päälle (kuva 15). Koneen kuormain oli Loglift F91 FT 100, jonka ulottuvuus oli 10 m. Kuormaimen oli kiinnitetty joukkokäsittelevä Nisulan 280E+ -hakkuulaite. Hakkuulaite painoi n. 330 kg. Alustakoneessa oli ketjut toisessa ja kolmannessa rengasparissa. Paalainyksikkö oli 2,8 m leveä, 2,8 m korkea, 4,1 m pitkä ja painoi 8000 kg. Koko koneyksikön paino oli 22960 kg. Alustakoneen moottoriteho oli valmistajan mukaan 125 kW. Vertailukone oli John Deere 1070D -harvesteri, joka oli varustettu joukkokäsittelevällä John Deere H412 -hakkuulaitteella ja teloilla (kuva 16).



Kuva 15. Testikoneena ollut Logman 811FC ja Fixteri FX15a paalainyksikkö.



Kuva 16. Vertailukone John Deere 1070D.

Molempien kuvioiden hakkuu videoitiin. Logmanin rajattomasti ympäripyörivän hytin ansiosta, videokamera voitiin asentaa hytin etulasiin imukuppikiinnityksellä. Tällöin kamera seurasi hyvin hakkuulaitteen liikkeitä, eikä hakkuulaite käynyt kuvan

ulkopuolella, muulloin kuin kuljettajan katkaistessa puun latvanosan ennen tyviosaa puun ollessa vielä pystyssä. Toinen työntutkijoista kuvasi vertailukoneen työskentelyn koneen ulkopuolelta käsivaralta käyttäen kolmijalkaa apuna mahdollisuuksien mukaan. Hakkuun päätyttyä paalainyksikön tallentama paalidata otettiin muistitikulle. Paalidatan avulla laskettiin jokaiselle paalille paalinteko-aika. Paalidatasta saatiin selville myös jokaisen paalin punnitustulos.

Kokopuupaalaimen työskentelyä tarkkaillut työntutkija numeroi paalaimen valmistamat paalit niiden tekojärjestyksessä. Paalain oli asetettu tekemään paaleista 75 cm halkaisijaltaan ja 2,6 m pitkiä. Konevalmistajan mukaan mitat olivat samat kuin aikaisemmassa Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa. Hakkuun jälkeen tallennettiin paalaimen keräämä data, josta ilmeni paalikohtaisesti punnitusajankohta sekä paalin tuorepaino. Paalin tekoajan ja painon välistä riippuvuutta tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimella. Paalainyksikössä oli kiinteästi asennettuna Tamtron Oy:n venymäliuskamittaukseen perustuva AV Pro-300 BT -vaakamalli. Vaaka mittasi paalin tuorepainon neljästä mittauspisteestä, silloin kun paalainyksikkö oli vaakatasossa.

Puut katkaistiin ja kaadettiin joukkokäsittellen, jonka jälkeen puunippu syötettiin paalaimen syöttöpöydälle. Saadakseen puunipun tyven kunnolla syöttörullille, kuljettaja joutui siirtämään otetta puunipussa, sillä hakkulaitteessa ei ollut syöttöominaisuutta. Syöttörullat vetivät puunipun syöttöyksikön kautta alakammioon, jossa rungot katkaistiin 2,6 m pituuteen. Paalaimen automatiikka huolehti puiden syöttämisestä paalaimen, joten kuljettaja pystyi paalauksen aikana siirtämään konetta tai keräilemään uusia puita (kuva 17). Paalaimen anturit valvoivat paalin kokoa. Paalin ollessa halutun kokoinen puunippu nostettiin nostopöydän avulla yläkammioon, jossa paali tiivistettiin ja sidottiin sidontaverkolla. Verkkoa kierrettiin puunipun ympäri n. viisi kierrosta. Sidonnan aikana automatiikka syötti uutta puuainesta paalaimen seuraavan paalin raaka-aineeksi. Sidottu paali laskettiin paalaimen vasemmalle puolelle punnitusvarsille punnittavaksi. Punnitsemisen jälkeen paali pudotettiin ajouran vasemmalle puolelle odottamaan metsäkuljetusta.



Kuva 17. Kuljettaja keräilee uusia runkoja samaan aikaan, kun paalain syöttää uutta puuta paalaimen alakammioon. Yläkammiosta on juuri valmistumassa sidottu paali ja punnitusvarret ovat laskeutumassa alas.

Kokopuun paalauksessa käytettiin seuraavaa työvaihejakoa:

1. Hakkuulaitteen vienti puulle
2. Hakkuu ja puiden keruu (puiden lukumäärä taakassa kirjattiin)
3. Taakan tuonti ja kuormaus paalaimelle
4. Puunipun syöttö paalaimen
5. Työpistesiiirtyminen
6. Paalaimen odottaminen
7. Järjestelyt yms.
8. Keskeytykset (syy kirjattiin)

Työvaiheiden limittyessä ajanmenekit kirjattiin siten, että hakkuutyöhön liittyvät työvaiheet olivat ensisijaisia. Hakkuu ja puiden keruu alkoi, kun hakkuulaite oli viety ensimmäisen katkaistavan rungon tyvelle ja päättyi, kun viimeisen katkaistavan rungon jälkeen hakkuulaitetta alettiin kallistaa puunipun kaatamiseksi. Videoanalyysin yhteydessä taakassa olleiden puiden lukumäärä kirjattiin ylös. Taakan tuonti ja kuormaus paalaimelle päättyi, kun puunipun tyvi osui paalaimen syöttörulliin. Tästä useimmiten alkoi hakkuulaitteen vienti puulle. Taakan tuontiin ja kuormaukseen paalaimelle sisältyi vaihe, jossa kuljettaja siirtää hakkuulaitteen pihlien otetta nipussa. Kaikki keskeytykset ja niiden syyt kirjattiin. Paalaimen

odottaminen kirjattiin silloin, kun kuljettaja joutui odottamaan esimerkiksi paalainyksikön kääntöä tai syöttöä, eikä näin ollen voinut jatkaa hakkuutyötä.

Karsitun rangan hakkuussa käytettiin seuraavaa työvaihejakoa:

1. Hakkuulaitteen vienti puulle
2. Hakkuu ja puiden keruu (puiden määrä taakassa kirjattiin)
3. Taakan tuonti käsittelypaikalle
4. Karsinta ja katkonta
5. Työpistesiiirtyminen
6. Raivaus
7. Järjestelyt yms.
8. Keskeytykset (syy kirjattiin)

Työvaihejako pyrittiin luomaan samankaltaiseksi kokopuun paalauksen kanssa. Kuten kokopuun paalauksessakin, hakkuutyöhön liittyvät työvaiheet olivat ensisijaisia ja työvaiheet alkoivat ja päättyivät kuten kokopuun paalauksessa. Taakan tuonti käsittelypaikalle alkoi, kun hakkuulaitetta alettiin kallistaa viimeisen kaatosahauksen jälkeen. Mikäli karsinta ja katkonta aloitettiin ennen kuin taakka oli käsittelypaikalla (useimmiten koneen edessä), karsinta ja katkonta olivat esisijainen työvaihe ja sen ajanmenekki kirjattiin ylös.

Tämän tutkimuksen tarpeisiin Metsäteho Oy hankki lisenssin Video Timer Pro -videoanalyysi ohjelmiston käyttöön (<http://www.acsco.com>). Hankitun videomateriaalin analysoinnin lisäksi tavoitteena oli kerätä kokemusta ohjelmistosta ja kartoittaa videoanalyysin tuomia mahdollisuuksia tuottavuustutkimusten teossa tulevaisuudessa. Hakkuuvideot analysoitiin ja sen perusteella laskettiin kaikkien työvaiheiden ajanmenekit. Ohjelmiston tuottama data vietiin Microsoft Exceliin, jossa lopulliset laskennat ja kuvaajat tehtiin.

3.2 Kokopuupaalien ja karsitun rangan metsäkuljetus

Metsäkuljetus suoritettiin kaksi päivää myöhemmin Ponsse Elk -kuormatraktorilla, joka ajoi molemmat kuviot omiin varastopaikkoihinsa (kuva 18). Konevalmistajan mukaan kuormatraktorin moottoriteho oli 129 kW ja tavallisimman kokoonpanon mukainen kuormatraktorin omapaino oli 17400 kg. Tutkimuksessa käytetty kone oli jossain määrin painavampi, johtuen lisävarusteisesta pyöräparista. Kuormatraktoriin oli jälkiasennettu takimmaisen pyöräparin taakse ylimääräinen pyöräpari, jonka seurauksena takimmaista pankkoa oli siirretty muutamia kymmeniä senttejä kohti koneen ohjaamo, minkä seurauksena kuormatila oli noin 30 cm vakiorakenteista kuormatilaa lyhyempi. Kone oli varustettu teloilla. Kuormain oli Ponsse K70+, jonka ulottuvuus oli 10 m. Koneessa oli Ponssen LoadOptimizer -kuormainvaaka. Kuljettajalla oli noin neljän vuoden kokemus metsäkuljetuksesta. Työntutkija videoi metsäkuljetuksen käsivaralta koneen ohjaamosta.



Kuva 18. Metsäkuljetus suoritettiin Ponsse Elk -kuormatraktorilla.

Kokopuupaaleja kasattiin kuormatilaan kahteen riviin. Kuorman täytyttyä kuorma ajettiin varastopaikalle. Varastopaikalla kuormainvaaka taarattiin ennen purkua.

Kokopuupaalien metsäkuljetuksessa käytettiin seuraavaa työvaihejakoa:

1. Tyhjänäajo
2. Kuormaus
3. Kuormausajo
4. Kuormattuna-ajo
5. Peruuttelu yms.
6. Purku
7. Paalien järjestelyt
8. Siivous ja siirtymiset
9. Keskeytykset

Tyhjänäajo alkoi, kun kone lähti tyhjänä varastolta ja päättyi, kun kone pysähtyi ensimmäiselle kuormattavalle paalille. Kuormaus alkoi, kun kuljettaja siirsi kuormaimen pois kuormatilasta ja päättyi kun kuljettaja laski kuormaimen tyhjänä kuorman päälle. Kuormaukseen liittyvät työvaiheet olivat ensisijaisia ja niiden ajanmenekki kirjattiin, mikäli työvaihe limittyi muiden työvaiheiden kanssa. Peruuttelu käsitti mm. koneen kääntämistä esim. ylettyäkseen siirtämään ajouralle jääneen paalin ajouran viereen. Purku alkoi, kun kuormainta alettiin liikuttaa ensimmäisen taakan keräämiseksi ja päättyi, kun kuormain tuotiin kuormauksen jälkeen takaisin tyhjään kuormatilaan. Keskeytysten syy kirjattiin.

Jokainen hakkuun yhteydessä numeroitu paali punnittiin erikseen kuormatraktorin kuormainvaa'alla purkuvaiheessa. Tätä ei normaalisti työskenneltäessä tehdä, sillä paalit on punnittu jo hakkuun yhteydessä. Tässä tutkimuksessa paalit punnittiin lisäksi kuormainvaa'alla, koska haluttiin punnita molemmat erät kertaalleen samalla menetelmällä. Koska molemmat vertailtavat erät punnittiin samalla tekniikalla, voitiin tuloksia korjata, mikäli paalien punnituksissa esiintyi systemaattista eroa mittausmenetelmien välillä. Lisäksi kaikkien kuormien kokonaismassa ja paalien lukumäärä otettiin ylös.

Karsitun rangan metsäkuljetuksessa käytettiin samaa työvaihejakoa lukuun ottamatta paalien järjestelyä. Karsittujen rankojen metsäkuljetuksessa otettiin ylös kaikkien

kuormien kokonaisuudessa. Kuormainvaaka taarattiin ennen metsäkuljetuksen aloittamista testipunnuksella.

Hakkuun ja metsäkuljetuksen yhteydessä kerätty videomateriaali analysoitiin Video Timer Pro -ohjelmistolla. Videoanalyysin pohjalta laskettiin työvaihekohtaiset ajanmenekit kokopuun paalauksen, karsitun rangan hakkuun ja molempien puutavaralajien metsäkuljetuksen osalta. Videotallenteelta laskettiin kaikki kaadetut rungot ja paalaimen tuottamasta datasta laskettiin koko tuotoksen massa kilogrammoina. Nämä tiedot yhdistämällä laskettiin koneyksikölle tehotuntituotos. Muuntokertoimella 1,46 muutettiin kokopuupaalaimen tehoaika käyttöajaksi (Kärhä ym. 2009). Harvesterin käyttöaika laskettiin tehoajasta muuntokertoimella 1,393 (Kuitto ym. 1994, Ryynänen & Rönkkö 2001, Heikkilä ym. 2005 Kärhä ym. 2009). Tuoretiheysluvulla 892 kg/m^3 muutettiin massa kilogrammoina kiintokuutiometreiksi (Maa- ja metsätalousministeriön asetus...2010). Metsäkuljetuksen yhteydessä kuormainvaa'alla punnituista paaleista saatiin kaksi punnitustulosta. Näitä Fixterin ja kuormainvaa'an punnitustuloksia vertailtiin keskenään. Paalainyksikön eri prosessivaiheiden ajanmenekkeihin ei tässä työssä keskitytty, kuin niiltä osin, jolloin paalainyksikön toiminta hidasti muuta hakkuutyötä ja tätä kautta johti tuottavuuden alenemiseen. Metsäkuljetuksen pienen otoskoon (35 paalia) vuoksi tuotantoketjun kilpailukyvyn tarkastelussa käytettiin avuksi Laitilan ym. (2009), Kärhän ym. (2009) ja Laitilan & Väätäisen (2011) ja tuloksia.

3.3 Seuranta-aineisto

Loviisassa keväällä 2013 mitattiin puustotunnukset n. kolme viikkoa leimikon hakkuun jälkeen. Hakkuutyömaa koostui kahdesta kuvioista (kuvat 19 ja 20). Tuolloin metsäkuljetus oli vielä tekemättä. Molemmilla kuvioilla kokopuun paalaus oli tehty Logman 811FC -alustakoneen takarungolle asennetulla Fixteri FX15 -paalainyksiköllä. FX15 on FX15a:n edeltäjä, eikä näin ollen täysin samankaltainen koneyksikkö kuin tässä työssä tutkittu tai Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkima FX15a. Konevalmistajan mukaan paalainyksiköiden merkittävimmät erot ovat

syötön ja paalin välitasolle noston nopeudessa. FX15a-mallin giljotiinin leikkaustehoa on nostettu, mikä nostaa työskentelynopeutta, sillä aikaisemmassa mallissa runkojen katkaisu ei onnistunut yhdellä terän liikkeellä. Lisäksi uudemman mallin toimintavarmuus on parantunut edelliseen malliin verrattuna. Loviisassa työskennellyt koneyhdistelmä oli varustettu joukkokäsittelevällä Nisulan 280E-hakkuulaitteella.

Koealoja sijoitettiin systemaattisesti kuusi kappaletta kummallekin kuviolle. Koealat sijoitettiin 50 m välein siten, että kaksi ajouralle, kaksi 4 m ajouralta sivuun ja kaksi 7 m ajouralta sivuun. Koealojen säde oli 3,99 m. Koealan pystypuista kirjattiin ylös puulaji, kantoläpimitta, rinnankorkeusläpimitta, pituus ja elävän latvuksen raja. Kaikki koealan kannot mitattiin ja niistä kirjattiin ylös puulaji ja kantoläpimitta. Korjuujälkeä tarkasteltiin silmämääräisesti.

Hakkuuyrittäjältä hankittiin paalaimen tallentama data kyseisiltä kuvioilta. Siitä ilmeni jokaisen paalin punnitusajankohta ja tuorepaino. Fixteri FX15-seurantakoneen paalidata analysoitiin samalla tavalla Uuraisilta saadun paalidatan kanssa. Uuraisilla työskennelleen FX15a-koneen ja FX15-seurantakoneen tallentaman paalidatan avulla laskettiin paaleille tekoajat. Paalien tekoajojen normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin ja Shapiro-Wilkin testeillä (Ranta ym. 2012). FX15a- ja FX15-koneiden paalintekoajojen tilastollista eroavaisuutta testattaessa, FX15a:n paalin valmistuksen tehoajat muunnettiin käyttöajaksi muuntokertoimella 1,46 (Kärhä ym. 2009). Näin molempien koneiden työskentelyasetelma saatiin vastaamaan toisiaan. Normaalisti jakautuneiden arvojen testaus suoritettiin riippumattomien otosten T-testillä ja normaalijakaumasta poikkeavien arvojen testaus ei-parametrisella Mann-Whitneyn U-testillä (Ranta ym. 2012). Seurantakoneen työskentelyä ei oltu paikan päällä seuraamassa, joten keskeytysten syitä ei ollut tiedossa. Tämän vuoksi aineiston laskennan yhteydessä siitä karsittiin pois sellaiset paalit, joiden tekoajaksi muodostui joko alle minuutti tai yli 15 minuuttia.



Kuva 19. Fixteri FX15 -seurantakoneen hakkaama kuvio 2 Loviisassa.



Kuva 20. Loviisassa kuviolla 1 pääpuulaji oli koivu.

Syksyllä 2012 sama FX15-seurantakone työskenteli Pornaisissa. Leimikon paalidata analysoitiin kuten Loviisan leimikon paalidata. Pornaisten ja Loviisan leimikoiden välillä paalinyksikkö kävi valmistajalla huollossa, jossa korjattiin paalaimen ohjelmistoon ja paalien mittaukseen liittyviä ongelmia.

3.4 Kustannusperusteet

Tutkimuksessa olleiden harvesterin ja kokopuupaalaimen kustannuslaskenta suoritettiin Metsäteho Oy:n puutavaran korjuun kustannusten laskentaohjelmalla. Kokopuupaalaimen oletettiin työskentelevän perinteisten harvennusharvestereiden tapaan, kahdessa vuorossa yhteensä 46 viikkoa vuodessa. Paalainyksikön ja alustakoneen arvonlisäverottomaksi hankintahinnaksi oletettiin yhteensä 500 000 €. Fixteri-kokopuupaalaimen ja hakkuukoneen käyttötuntikustannuksiksi muodostui 100 € ja 90 €. Tulosten esittelyn yhteydessä on esitetty mahdollisen energiatuen vaikutus kokopuupaalaimen käyttötuntikustannuksiin ja tehdashintaan.

Lähikuljetuksen kustannusten laskennassa käytettiin Kärhän ym. (2009) tutkimustuloksia kokopuupaalien metsäkuljetuksesta. Hakkuukertymän ja metsäkuljetusmatkan oletettiin olevan 60 m³/ha ja 300 m. Kuormatraktorin käyttötuntikustannukseksi muodostui 75 €. Kaukokuljetusmatkan oletettiin olevan 100 km. Kaukokuljetuksen, haketuksen, terminaalitoimintojen sekä terminaalin ja käyttöpaikan välisten kustannusten laskennassa käytettiin Laitilan & Väätäisen (2011) esittämiä kustannuslukuja. Käytetyt kaukokuljetuskustannukset kokopuupaaleille ja rangalle olivat 8 €/m³ ja 7,7 €/m³ 100 km:n kaukokuljetusmatkalla. Haketus- ja terminaalitoimintokustannukset sekä kuljetus terminaalista käyttöpaikalle olivat 3 €/m³, 1 €/m³ ja 2,6 €/m³ (Laitila & Väätäinen 2011). Kantohinnaksi oletettiin 12 €/m³ ja hankinnan yleiskuluiksi 3 €/m³.

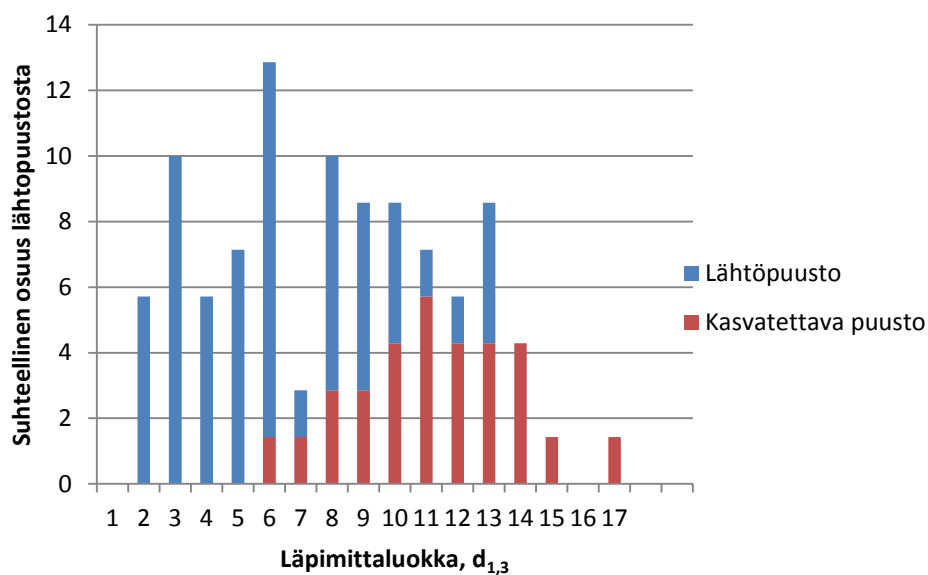
4 Tulokset

4.1 Kokopuun paalaus ja karsitun rangan hakkuu

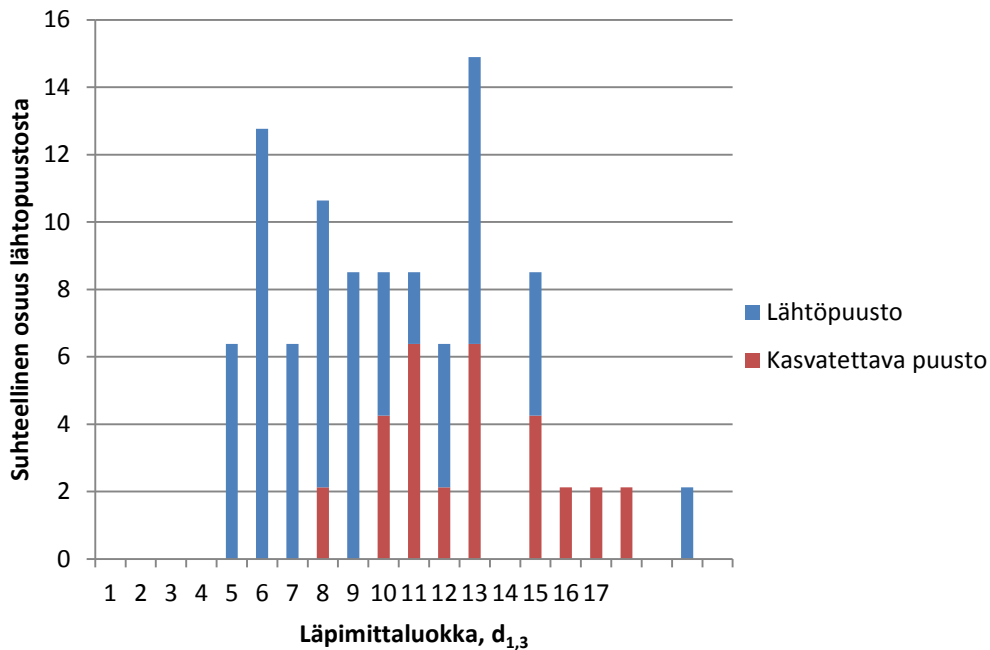
Taulukko 6 sisältää poistuman puustotiedot sekä tiedot puuston tilasta ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen molemmilta aikatutkimuskuviolta. Lähtöpuuston, poistuman ja kasvatettavan puuston jakautuminen läpimittaluokkiin käy ilmi kuvista 21 ja 22.

Taulukko 6. Poistuman puustotiedot sekä koko metsikön puustotiedot ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen.

| | Tiheys, r/ha | Keski- pituus, h | Läpimitta, $d_{1,3}$ | Pohjapinta- ala, m^2 | $dm^3/$ kokopuu |
|----------------------------|-----------------|---------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| Ennen hakkuuta | | | | | |
| FX15a | 2260 | 9,4 | 8,3 | 17,2 | 45,34 |
| JD 1070D | 2833 | 11,5 | 10,7 | 23,2 | 75,74 |
| Poistuma | | | | | |
| FX15a | 1300 | 8,6 | 6,3 | 7,2 | 37,3 |
| JD 1070D | 2133 | 11 | 9,5 | 13,5 | 52,4 |
| Kasvatettava puusto | | | | | |
| FX15a | 960 | 10,5 | 11,4 | 10 | 70,1 |
| JD 1070D | 700 | 12,5 | 13,4 | 9,7 | 103,5 |

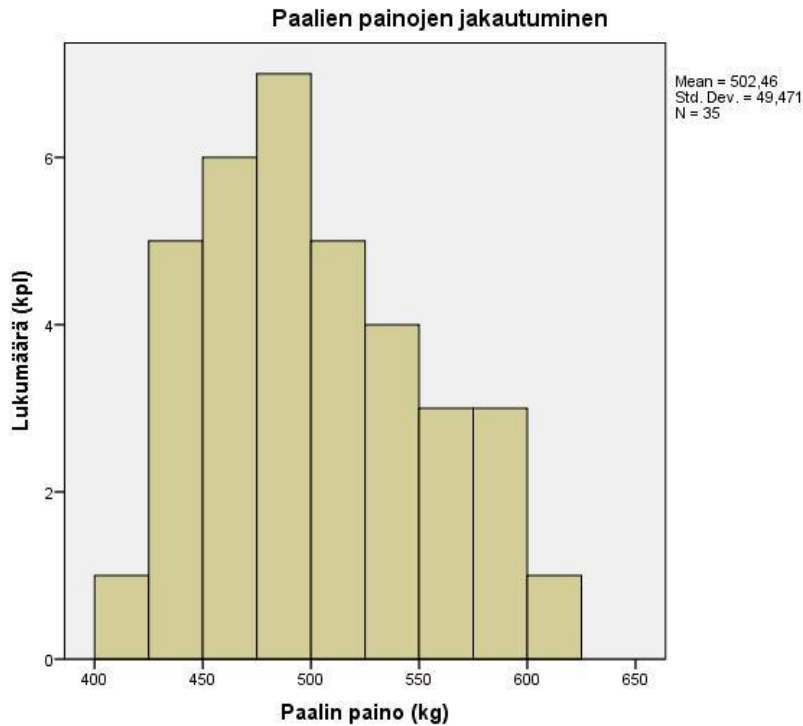


Kuva 21. Lähtöpuuston ja kasvatettavaksi jätetyn puuston jakautuminen läpimittaluokkiin Fixterin käsittelemällä kuviolla.



Kuva 22. Lähtöpuuston ja kasvatettavaksi jätetyn puuston jakautuminen läpimittaluokkiin karsitun rangan hakkuukuviolla.

Kokopuupaalaimella koealakovion hakkaamiseen kului yhteensä 130,49 minuuttia. Hakkuu keskeytyi kaksi kertaa. Ensimmäisellä kertaa hakkuulaitteen tiltin öljynnipa vioittui puukontaktin seurauksena, ja hakkuu jouduttiin keskeyttämään korjauksen ajaksi. Huoltohenkilöstö vaihtoi vioittuneen osan muutamassa minuutissa ja hakkuuta päästiin jatkamaan. Toinen keskeytys aiheutui sidontaverkon sotkeutumisesta paalaimen tiivistysketjuihin. Kuljettaja kävi purkamassa sotkeutuneen verkon ja asetti sen uudelleen paikoilleen muutamassa minuutissa. Edellä mainitut keskeytykset pois lukien hakkuussa kului aikaa 121,45 min. Paaleja valmistui yhteensä 35 kappaletta. Paalien kokonaisuudessa Fixterin punnituksen mukaan oli 17 586 kg. Näin ollen keskimääräiseksi paalin painoksi muodostui 502,5 kg (kuva 23, taulukko 7).



Kuva 23. Keskimääräinen paalin massa oli 502 kg.

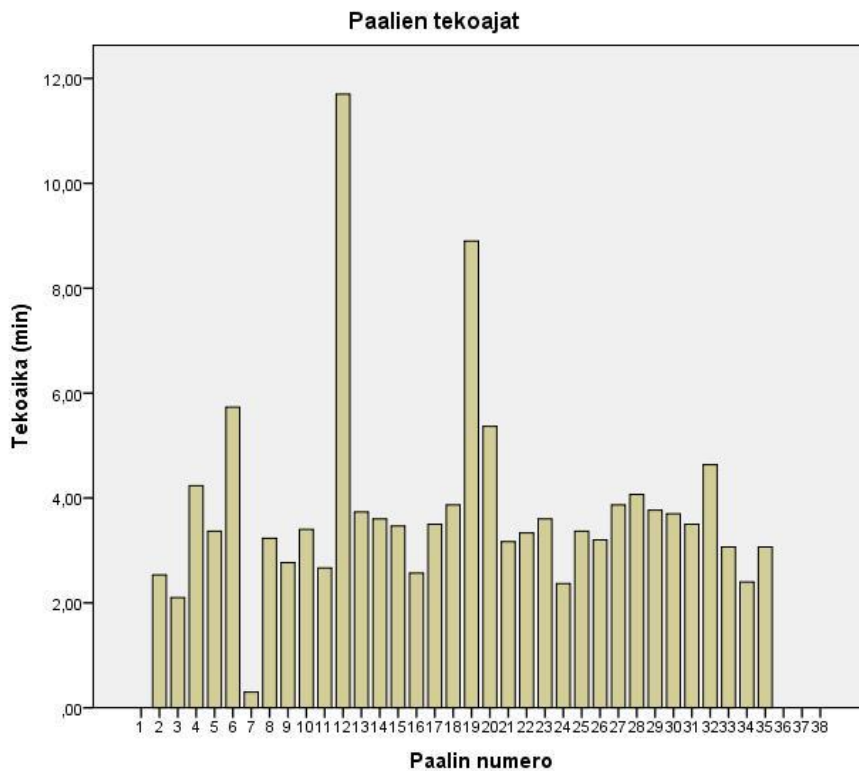
Taulukko 7. Kaikkien kokopuupaalien painojen keskiarvo, keskihajonta, minimi, maksimi ja kokonaismassa.

| Paalien yhteenveto | | | | | |
|---------------------------|--------|----------------|---------|---------|----------|
| N | Mean | Std. Deviation | Minimum | Maximum | Sum |
| 35 | 502,46 | 49,47 | 415,00 | 603,00 | 17586,00 |
| Paino (kg) | | | | | |

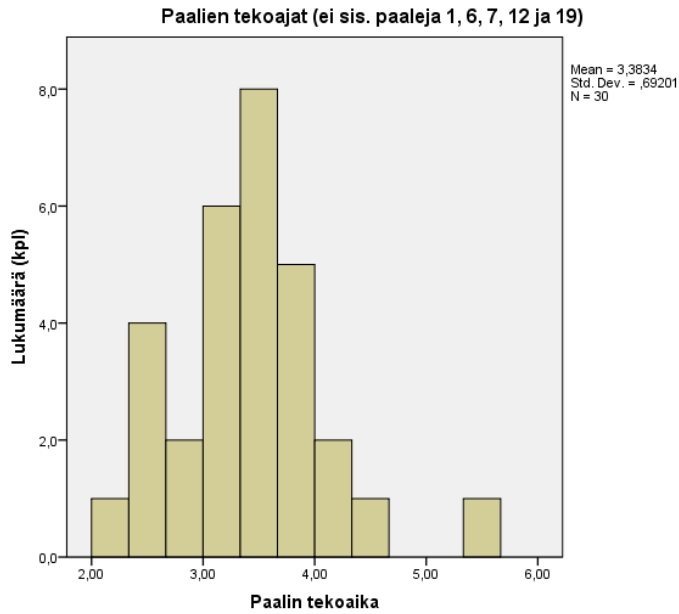
Runkoja kertyi yhteensä 529 kappaletta ja rungon keskimääräinen massa oli 33,2 kg. Käyttäen mäntykuitupuun tuoretiheyslukua 892 kg/m^3 (Maa- ja metsätalousministeriön asetus... 2010) koko kertymän tilavuus oli 19,7 kiintokuutiometriä. Keskimääräisen paalin tilavuus oli $0,563 \text{ m}^3$. Tunnukset on laskettu paalaimen mittalaitteen keräämän tiedon perusteella.

Paalin keskimääräinen valmistusaika oli 3,77 min. Aineistossa oli neljä poikkeavaa havaintoa (kuva 24). Kaksi näistä on edellä mainittuja keskeytyksiä, jolloin paalien tekoajaksi muodostui 11,7 ja 8,9 minuuttia. Hakkuun aikana yksi paali putosi

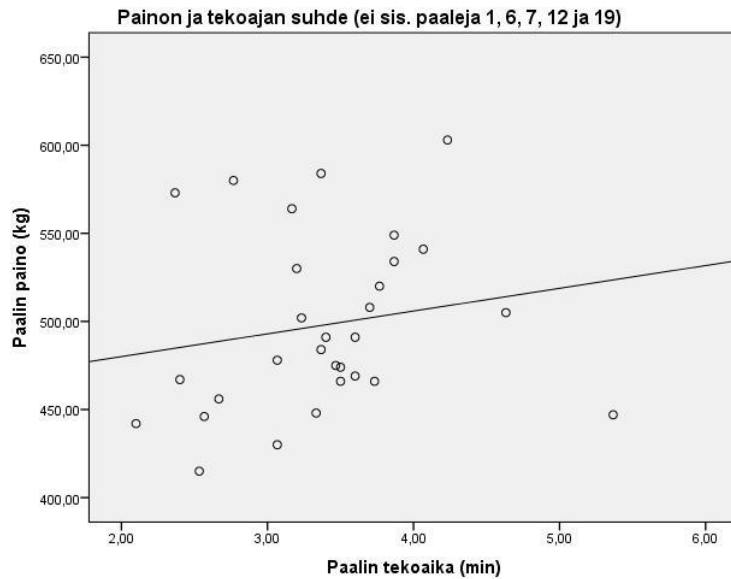
punnitusvarsien yli, eikä paalista saatu punnitustulosta. Kuljettaja joutui nostamaan pudonneen paalin erikseen takaisin punnitusvarsille, jolloin paalin tekoajaksi tuli vain 0,3 minuuttia. Kyseisen paalin tekoaika on alhainen, koska paalien tekoajat on laskettu punnitusajankohtien erotuksena. Samasta syystä johtuen pudonnutta paalia edeltävän paalin tekoaika käsittää molempien paalien tekemiseen kuluneen ajan. Laskentatavasta johtuen ensimmäisenä valmistuneelle paalille ei pystytä laskemaan tekoaikaa. Jätettäessä poikkeavat havainnot tarkastelun ulkopuolelle oli paalin keskimääräinen valmistusaika 3,38 minuuttia (kuva 25). Paalin painon ja valmistukseen käytetyn ajan sekä paalin painon ja tuottavuuden välillä havaittiin olevan alhainen korrelaatio (kuvat 26 ja 27).



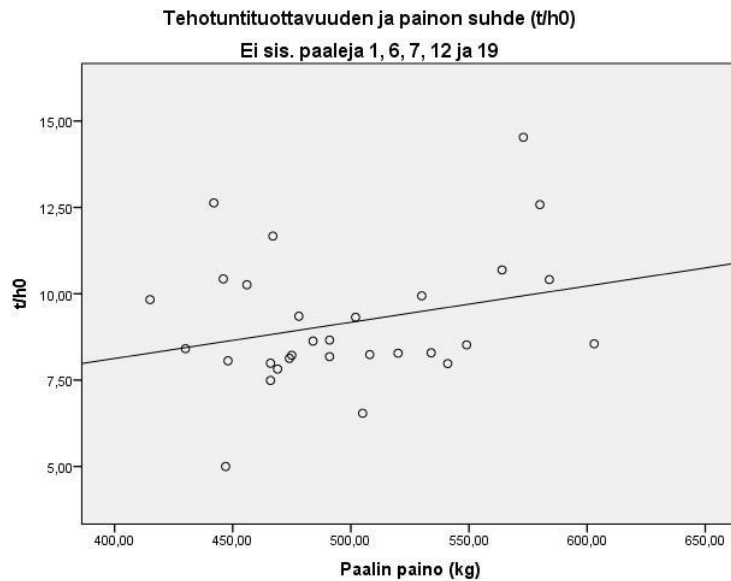
Kuva 24. Poikkeavat kolme havaintoa (7, 12 ja 19) erottuvat muusta aineistosta selkeästi. Havainto 6 ei selkeästi poikkea muista havainnoista mutta sen arvo sisältää osittain myös paalin 7 tekoajan. Ensimmäiselle paalille ei ole voitu laskea valmistusaikaa.



Kuva 25. Paalin keskimääräinen valmistusaika oli 3,38 min, kun poikkeavat havainnot on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Paalintekoaikojen normaalijakautuneisuus testattiin Kolmogorov-Smirnovin testillä. Jakauma ei ollut normaalisti jakautunut ($p < 0,05$).

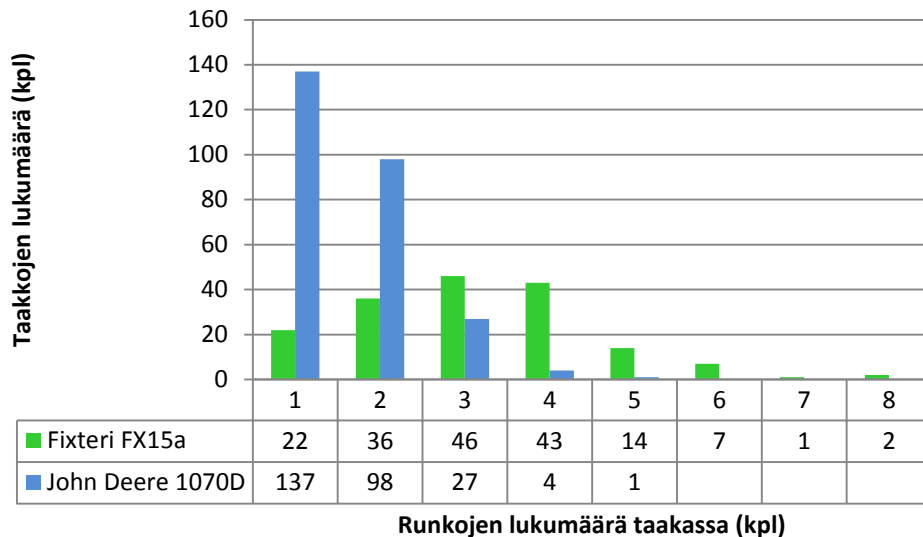


Kuva 26. Paalin painon ja sen tekemiseen käytetyn ajalla välillä vaikuttaisi olevan alhainen korrelaatio. Korrelaatiokerroin oli 0,179.



Kuva 27. Tuottavuuden ja paalin painon välillä on alhainen korrelaatio. Korrelaatiokerroin oli 0,274.

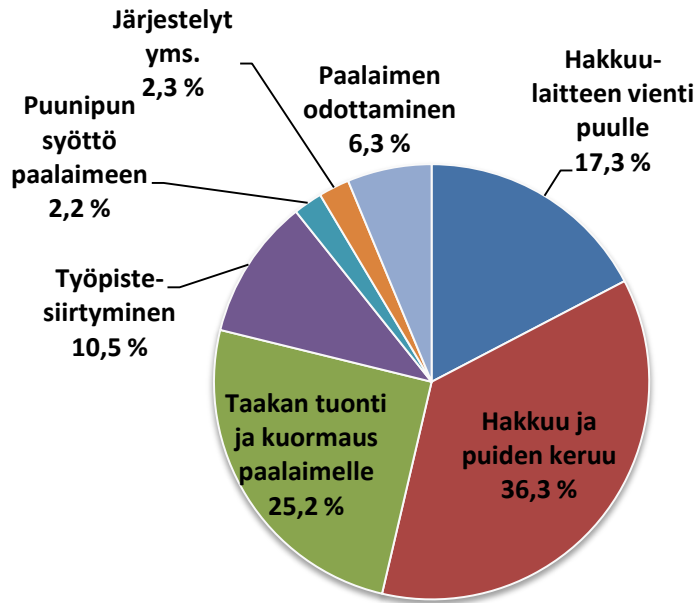
Fixteri FX15a:n käsittelemällä kuviolla poistuman keskitilavuus oli 37,3 dm³/runko. Kuviolla, jossa hakattiin karsittua rankaa, oli poistuman keskitilavuus 45,8 dm³/runko. Fixterin kuljettaja käytti joukkokäsittelyä tehokkaasti, keskimäärin 3,1 puuta taakassa (kuva 28). Enimmillään puuta oli taakassa 8 kappaletta. Keskimääräinen taakkakoko harvesterilla oli 1,6 puuta. Harvesterin joukkokäsittelyprosentti jäi huomattavasti alhaisemmaksi, sen ollessa vain 69 %, kun Fixterillä vastaava osuus oli 96 %. Yksinpuin käsiteltyjä taakkoja oli Fixterillä 22 kpl, kun harvesterilla niitä oli 137 kpl. Fixteri käsitteli taakkoja yhteensä 171 kpl, kun harvesterille niitä tuli 267 kpl. Näin ollen taakkojen kokonaislukumäärä oli harvesterilla huomattavasti suurempi, vaikka kokonaiskertymät olivat lähellä toisiaan. Fixterin ja harvesterin kokonaiskertymät olivat 19,7 m³ ja 19,8 m³.



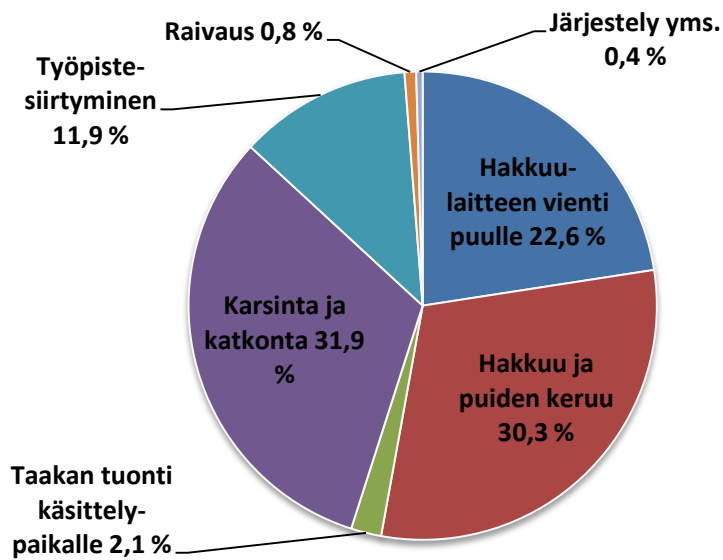
Kuva 28. Runkomäärät taakoissa Fixterillä ja harvesterilla.

Fixteri FX15a:n tuottavuus oli 9,74 m³/h₀. Tehoajanmenekki muutettiin käyttöajanmenekiksi kertoimella 1,46 (Kärhä ym. 2009). Näin saatiin tuottavuudeksi 6,7 m³/h₁₅. Karsitun rangan hakkuussa tehotuntituotos oli 10,50 m³. Käyttötuntituotos 7,53 m³ johdettiin kertoimella 1,393 (Kuitto ym. 1994, Ryyänen & Rönkkö 2001, Heikkilä ym. 2005, Kärhä ym. 2009). Hakkuukertymät olivat Fixterillä 62,2 m³/ha ja harvesterilla 84,7 m³/ha.

Kokopuun paalauksen ja karsitun rangan hakkuun tehoaika jakautui eri työvaiheisiin kuvien 29 ja 30 mukaisesti. Molemmilla koneilla suurin osa tehoajasta kului hakkuuseen ja puiden keruuseen. Fixterin osalta raivaukseen ei kulunut aikaa, koska kokopuuta paalatessa paalattiin myös pienet puut, jotka muuten kaadettaisiin maahan. Taulukosta 8 ilmenee myös työvaiheiden keskimääräinen kesto sekunteina molemmilta tutkituilta metsäkoneilta.



Kuva 29. Fixteri FX15a:n työvaiheiden suhteelliset osuudet tehoajasta.

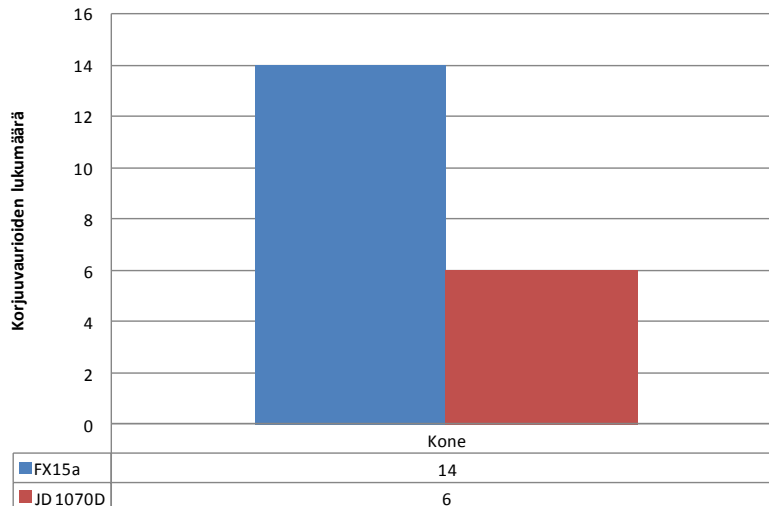


Kuva 30. Harvesterin työvaiheiden suhteelliset osuudet tehoajasta.

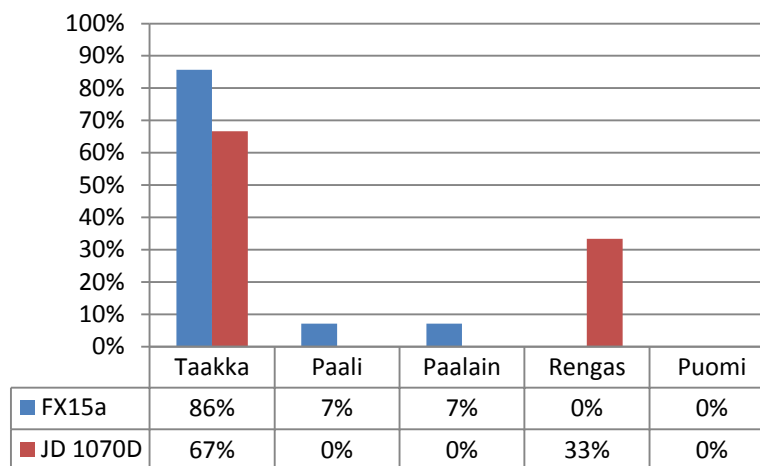
Taulukko 8. Tehoajan prosentuaalinen jakautuminen työvaiheisiin sekä keskimääräinen työvaiheen kesto tutkituilla metsäkoneilla.

| Työvaihe | Keskimääräinen kesto (s) | % |
|---------------------------------------|---------------------------------|----------|
| Fixteri FX15a | | |
| Hakkuulaitteen vienti puulle | 7,4 | 17,3 % |
| Hakkuu ja puiden keruu | 15,1 | 36,3 % |
| Taakan tuonti ja kuormaus paalaimelle | 9,3 | 25,2 % |
| Työpistesiiirtyminen | 14,7 | 10,5 % |
| Puunipun syöttö paalaimeseen | 12,1 | 2,2 % |
| Järjestelyt yms. | 27,8 | 2,3 % |
| Paalaimen odottaminen | 13,0 | 6,3 % |
| John Deere 1070D | | |
| Hakkuulaitteen vienti puulle | 5,7 | 22,6 % |
| Hakkuu ja puiden keruu | 7,7 | 30,3 % |
| Taakan tuonti käsittelypaikalle | 3,7 | 2,1 % |
| Karsinta ja katkonta | 8,2 | 31,9 % |
| Työpistesiiirtyminen | 10,9 | 11,9 % |
| Raivaus | 10,9 | 0,8 % |
| Järjestely yms. | 15,1 | 0,4 % |

Puustovaurioita syntyi Fixterin hakkaamalle kuviolle huomattavasti enemmän kuin harvesterin hakkaamalle kuviolle (kuva 31). Kokopuun paalauksessa puustovaurioita kertyi jäävälle puustolle yhteensä 14 kpl, kun karsitun rangan hakkuussa niitä kertyi 6 kpl. Hakkuukuviot sijaitsivat hyvin kantavalla mäntykankaalla, eikä urapainumia näin ollen syntynyt. Kuvasta 32 nähdään, että suurimman osan puustovaurioista ovat aiheuttaneet kourataakassa olleet puut. Fixterillä 86 % ja harvesterilla 67 % vaurioista olivat taakan aiheuttamia kolhuja puiden kyljissä. Fixterin hakkaamalla kuviolla puustovaurioprocentti oli 4,6 ja harvesterin hakkaamalla kuviolla 3,6.



Kuva 31. Kokopuun paalauksessa puustovaurioita kertyi yli kaksinkertainen määrä karsitun rangan hakkuuseen verrattuna.



Kuva 32. Puustovaurioiden oletetut aiheuttajat. Molemmilla menetelmillä suurimman osan vaurioista aiheutti taakassa olevien puiden kosketus jäävien puiden runkoihin.

Harvesterilla kaksi vauriota aiheutui renkaan telan luiskahtaessa kiven päältä osuen jäävän puun kylkeen tehden siihen vaurion. Molemmilla kerroilla jäävän puun puuaines rikkoontui. Loput korjuuvauriot olivat pintavaurioita, joissa jäävän puun kuori oli vaurioitunut, mutta puuaines oli säilynyt ehjänä. Molemmilla kuvioilla vaurioiden keskimääräiset koot olivat lähellä toisiaan. Fixterillä 9,2 cm² ja harvesterilla 10,2 cm². Fixterillä ei ajourien väli, eikä uraleveys yltänyt suositusten mukaisiin arvoihin. Metsäteho Oy:n ”Korjuujälki harvennushakkuussa” -oppaan suositusten mukaan ajouraväli tulisi olla 20 metriä tai enemmän ja uraleveyden tulisi

olla korkeintaan 4 metriä (Iittiläinen ym. 2003). Molemmilla tutkimuskuvioilla ajoura hakattiin siten, että tienvarsivarastolta pääsi ajamaan lenkin ajouraa pitkin takaisin varastopaikalle. Fixterin hakkaamalla kuviolla ajourat myös hieman mutkittelivat, joten ajouraväli päätettiin mitata kolmesta havaintopisteestä. Harvesterin hakkuukuviolla ajouraväli mitattiin kahdesta havaintopisteestä. Molemmilla kuviolla uraleveys mitattiin neljästä havaintopisteestä. Fixterillä ajourien väliksi muodostui 17,4 m ja uraleveys oli 4,6 m. Harvesterilla ajourien väli oli 19,8 m uraleveyden ollessa 3,9 m. Ajouran pituudet olivat Fixterillä 182 m ja harvesterilla 118 m. Kuvat 33 ja 34 ovat otettu tutkimuskuvioilta heti hakkuun päätyttyä. Kuvista nähdään miten kokopuun paalauksen jäljiltä metsään ei jäänyt oksa- tai latvusmassaa.



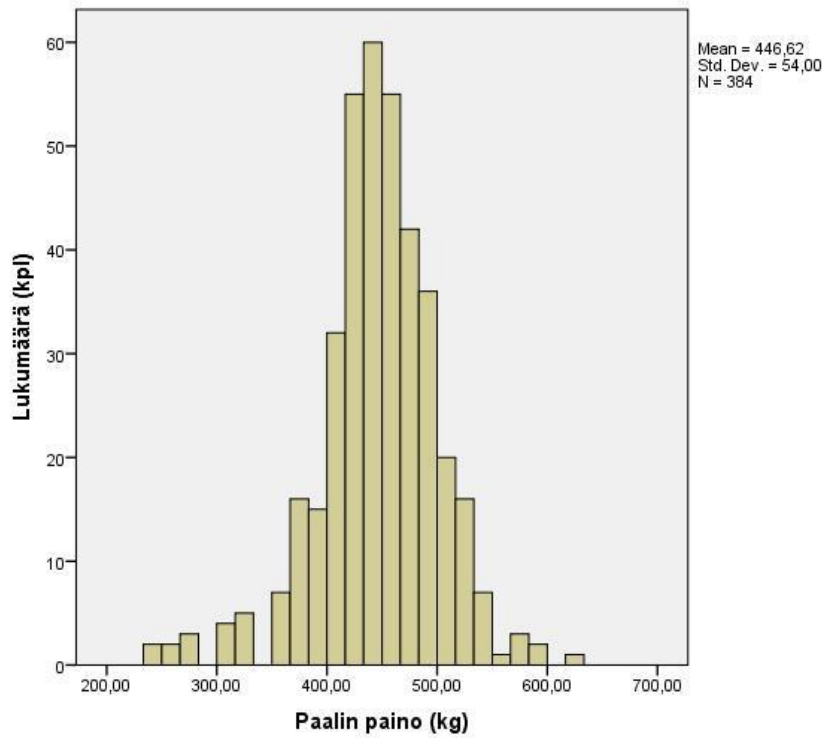
Kuva 33. Tutkimuskuvio kokopuun paalauksen jälkeen



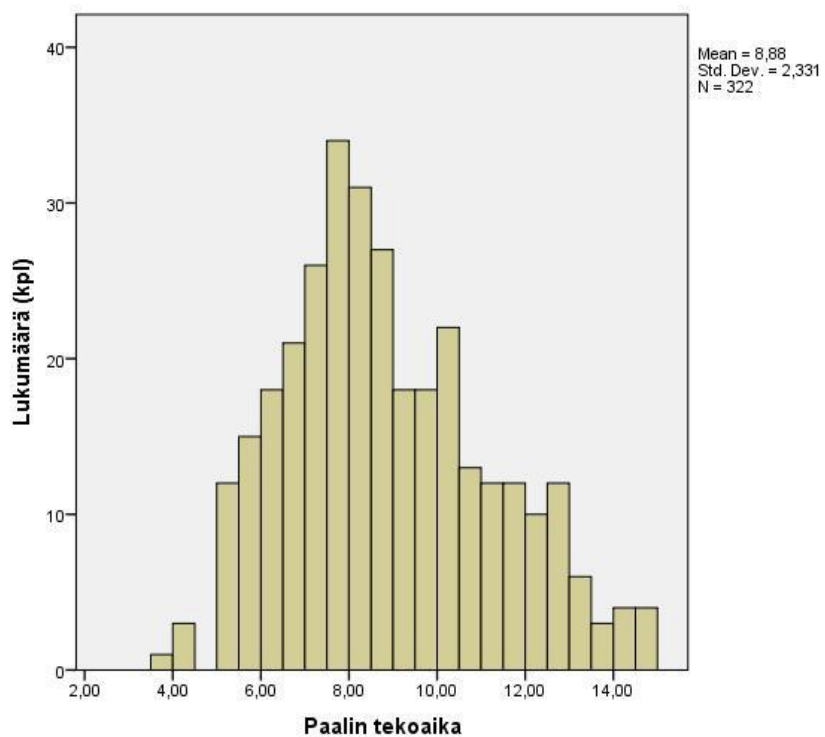
Kuva 34. Tutkimuskuvio rankahakkuun jälkeen

4.2 Hakkuun tuottavuus seurantakoneella

Lovisassa paaleja tehtiin yhteensä 384 kpl. Paalit painoivat keskimäärin 446,6 kg (kuva 35). Kun paalidatasta poistettiin paalit, joiden valmistamiseen oli kulunut yli 15 minuuttia tai alle minuutti, niin valmistukseen kulunut aika oli 8,88 min/paali (kuva 36). Tuottavuus oli keskimäärin 3,47 m³/h₁₅ kuviolla 1 ja 4,02 m³/h₁₅ kuviolla 2. Kuvion 1 osalta käytettiin tuoretiheyslukua 846 kg/m³ ja kuvion 2 osalta 816 kg/m³. Kuviolla 1 ja 2 poistuman keskikoot olivat 28,8 dm³ ja 41,1 dm³.

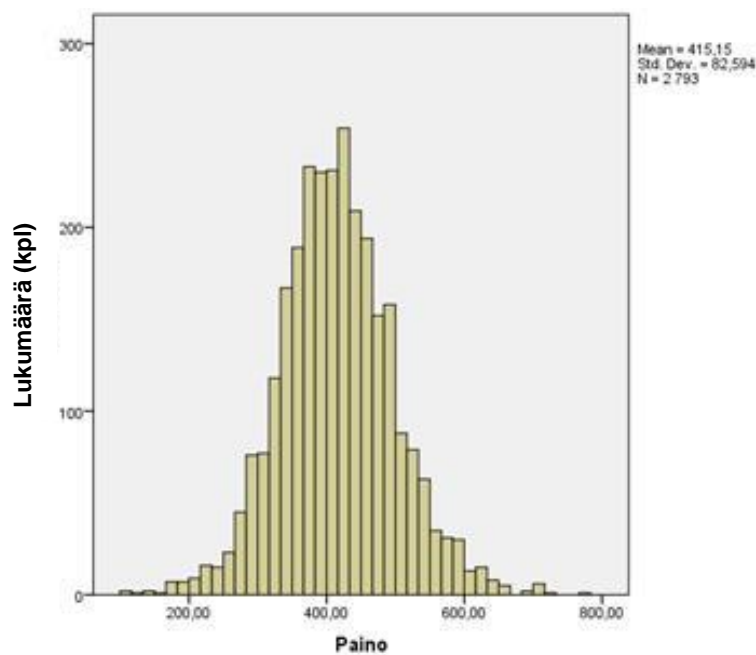


Kuva 35. FX15-seurantakoneen paalien painojen jakauma Loviisassa.

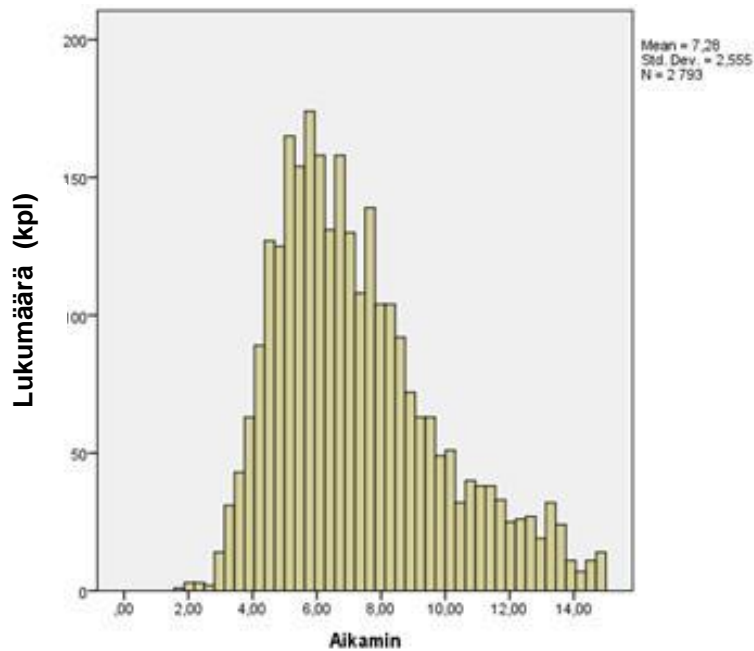


Kuva 36. Paalien tekoaikojen jakautuminen Loviisassa. Aineistosta poistettu 62 virheellistä havaintoa.

Toisella, saman Fixteri FX15, seurantakoneen työmaalla paaleja tehtiin 2793 kpl yhteensä kolmella kuviolla, joiden yhteenlaskettu pinta-ala oli 18,8 ha. Paalidatasta on poistettu paalit, joiden valmistamiseen oli kulunut yli 15 minuuttia tai alle minuutti. Lisäksi aineistosta poistettiin virheellisinä pidetyt havainnot, joissa tuottavuus oli yli 15 t/h. Paalin keskimääräinen valmistusaika aineistossa oli 7,28 minuuttia ja keskimääräinen paalin paino oli 415,15 kg (kuvat 37 ja 38). Korjatun puuston tuoretiheyden oletettiin olevan 850 kg/m³. Tuottavuus koko aineistossa oli 4,47 m³/h₁₅. Poistuman keskikoot kolmella kuviolla olivat 34,7, 41,1 ja 42,9 dm³.



Kuva 37. FX15-seurantakoneen paalien painojen jakauma Pornaisissa.



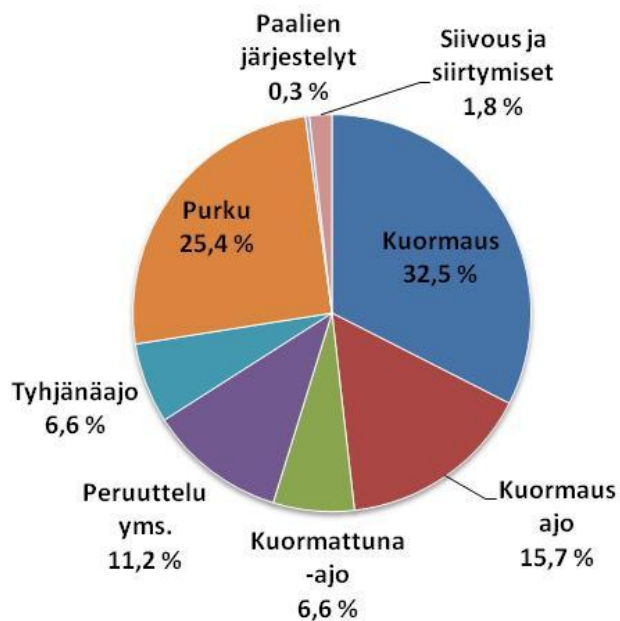
Kuva 38. Paalien tekoaikojen jakautuminen seurantakoneella Pornaisissa.

Kolmogorov-Smirnovin testin mukaan yksikään paalientekoajojen jakauma ei ollut normaalisti jakautunut ($p < 0,05$). Tästä syystä FX15-seurantakoneen ja FX15a-koneen paalintekoajan eroa testattiin Mann-Whitneyn U-testillä. FX15a- ja FX15-koneiden paalintekoajojen tilastollista eroa testattaessa, FX15a:n paalien tekoajat kerrottiin muuntokertoimella 1,46 (Kärhä ym. 2009). Muuntokerrointa käytettiin, koska FX15a:n paalidata oli tallennettu Uuraisilla lyhyen ja tehokkaan työskentelyn aikana, kun taas FX15:sta paalidata sisälsi lyhyitä keskeytyksiä ja perustui pidempiaikaiseen seurantaan. Paalien teko aika eri konemallien välillä erosi tilastollisesti merkitsevästi toisistaan ($p < 0,05$).

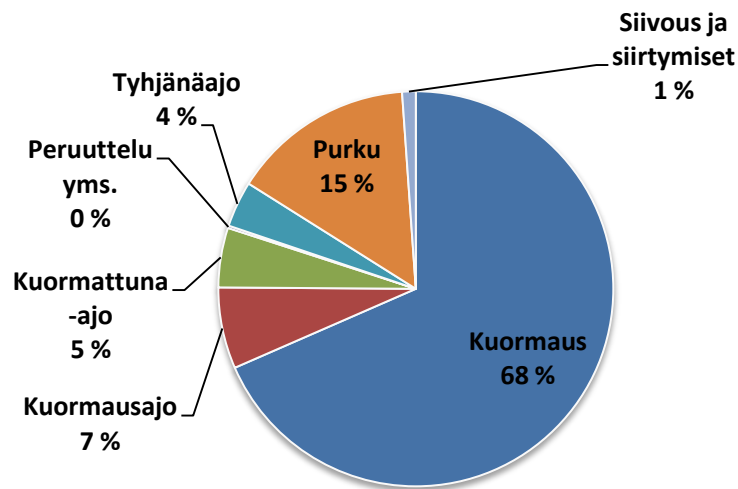
4.3 Kokopuupaalien ja karsitun rangan metsäkuljetus

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen kokonaisajanmenekki oli 88,25 minuuttia. Tehoajanmenekki oli 82,72 minuuttia. Tehoajan määrittämisessä ei ole huomioitu kuormainvään taarausta tai muita normaalia työrutiinista poikkeavia keskeytyksiä. Karsitun rangan metsäkuljetuksen kokonaisajanmenekki oli 86,77 minuuttia. Tehoajan määrittämisessä ei huomioitu järjestelyjä, jotka sisälsivät muun muassa kuormakoon kirjaamista. Tehoajanmenekki oli 85,10 minuuttia. Tehoajan

jakautuminen työvaiheisiin ilmenee kuvista 39 ja 40. Karsitun rangan metsäkuljetuksen tehoajasta selvästi eniten aikaa kului kuormaukseen (68 %), kun vastaava luku kokopuupaaleja kuljetettaessa oli 32,5 %. Purkuvaihe puolestaan vei kokopuupaaleilla (25,4 %) suhteellisesti enemmän aikaa kuin rankojen purku (15 %). Metsäkuljetusmatka paaleilla ja rangoilla oli 50 metriä. Keskimääräiset työvaiheiden ajanmenekit sekunteina ja prosentuaalinen jakauma tehoajan suhteen ilmenee taulukosta 9.



Kuva 39. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehoajan jakautuminen eri työvaiheisiin.





Kuva 40. Karsitun rangan metsäkuljetuksen tehoajan jakautuminen eri työvaiheisiin.

Taulukko 9. Tehoajan rakenne sekä keskimääräinen yksittäisen työvaiheen kesto tutkituilla tavaralajeilla.

| Työvaihe | Keskimääräinen kesto (s) | % |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|
| Kokopuupaalien metsäkuljetus | | |
| Kuormaus | 55,7 | 32,5 % |
| Kuormausajo | 25,9 | 15,7 % |
| Kuormattuna-ajo | 108,9 | 6,6 % |
| Peruuttelu yms. | 29,2 | 11,2 % |
| Tyhjänäajo | 162,8 | 6,6 % |
| Purku | 314,5 | 25,4 % |
| Paalien järjestelyt | 16,3 | 0,3 % |
| Siivous ja siirtymiset | 45,2 | 1,8 % |
| Karsitun rangan metsäkuljetus | | |
| Kuormaus | 83,2 | 68,5 % |
| Kuormausajo | 8,3 | 6,7 % |
| Kuormattuna-ajo | 82,9 | 4,9 % |
| Peruuttelu yms. | 10,0 | 0,2 % |
| Tyhjänäajo | 48,0 | 3,8 % |
| Purku | 381,6 | 14,9 % |
| Siivous ja siirtymiset | 56,9 | 1,1 % |

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehotuntituotos oli 14,3 m³ ja käyttötuntituotos 11,0 m³, kun metsäkuljetusmatka oli 50 m. Karsitun rangan metsäkuljetuksen teho- ja käyttötuntituotokset olivat 14,0 m³ ja 10,7 m³ 50 m metsäkuljetusmatkalla. Kuormatraktorin tehoajanmenekistä johdettiin käyttöajanmenekki muuntokertoimella 1,302 (Kärhä ym. 2009, Ihalainen & Niskanen 2010). Tarkempi kuormakohtainen tarkastelu ilmenee taulukosta 10.

Taulukko 10. Kokopuupaalikuormien kohdalla voidaan havaita paalien lukumäärän kuormissa olleen varsin pieni. Normaalista pienemmät kuormakoot johtuivat ensimmäisen kuorman sortumisesta kesken kuormattuna-ajon. Lukuja tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kuormilla ei ole keskenään samanpituiset metsäkuljetusmatkat.

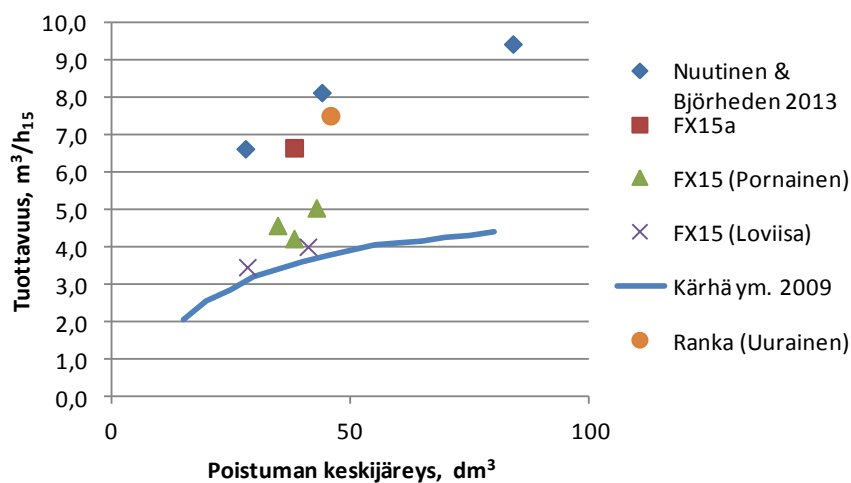
| Metsäkuljetuksen kuormakohtaiset tunnuks | | | | | | | |
|---|-----------|----------------------|---|----------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | Kg | m³ | paalia | h₀ | h₁₅ | m³/h₀ | m³/h₁₅ |
| Kokopuupaalit | | | | | | | |
| Kuorma 1 | 5934 | 6,65 | 12 | 0,62 | 0,81 | 10,7 | 8,2 |
| Kuorma 2 | 8398 | 9,41 | 16 | 0,60 | 0,78 | 15,8 | 12,1 |
| Kuorma 3 | 3446 | 3,86 | 7 | 0,16 | 0,21 | 24,3 | 18,7 |
| Karsittu ranka | | | | | | | |
| Kuorma 1 | 10733 | 12,03 |  | 0,85 | 1,10 | 14,2 | 10,9 |
| Kuorma 2 | 6949 | 7,79 |  | 0,57 | 0,75 | 13,6 | 10,5 |

5 Tarkastelu

5.1 Vertailulaskelmat aikaisempiin tutkimuksiin

Fixteri I -prototyypikoneen tutkimuksessa paalainyksikön tuottavuudeksi saatiin 2,6–3,7 m³ tehotunnissa, rungon koon vaihdellessa välillä 31–40 dm³. Joukkokäsittelyprosentti oli varsin alhainen, vain 8–36 % kaikista käsitellyistä rungoista (Jylhä & Laitila 2007). Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa havaittiin kokopuun paalauksen tehotuntituotoksen vaihtelevan välillä 3,6–7,0 m³. Fixteri II -koneella joukkokäsittelyprosentti oli 80 %. Kärhä ym. (2009) laskivat, että Jylhän ja Laitilan (2007) tutkimusasetelmaa vastaavissa olosuhteissa, Fixteri II -paalaimen

tehotuntituotos olisi ollut 4,6–5,1 m³. Sen sijaan Fixteri FX15a -mallin tuotokset olivat Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa 9,7, 11,9 ja 13,8 m³ tehotunnissa, kun keskimääräiset poistuman tilavuudet olivat 28, 44, 84 dm³. Tässä tutkimuksessa kokopuun paalauksen tehotuntituotokseksi saatiin 9,74 m³ poistuman keskitilavuuden ollessa 37,3 dm³. Joukkokäsittelyprosentti oli 96 %. Kuvassa 41 on esitetty kokopuun paalauksen käyttötuntituotos tässä sekä Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa, FX15-seurantakoneen ja Kärhän ym. (2009) selvittämät käyttötuntituotokset aikaisemmalta koneversioltä.



Kuva 41. Kokopuun paalauksen tuottavuus vuonna 2009 Fixteri II -mallilla (Kärhä ym. 2009) sekä uudella FX15a-mallilla vuonna 2013. Nuutisen ja Björhedenin (2013) ja Metsätehon FX15a havainnot ovat samalta koneyksiköltä. FX15 on tässä tutkimuksessa käytetty seurantakone. Pornaisten ja Loviisan työmaan välissä koneyksikkö kävi päivitettävänä konevalmistajalla.

5.2 Vertailulaskelmat karsitun rangan tuotantoketjuun

5.2.1 Hakkuu

Tässä tutkimuksessa kokopuiden paalauksen tehotuntituotos oli 9,74 m³. Käyttötuntituotos oli 6,7 m³. Muuntokertoimena käytettiin arvoa 1,46 (Kärhä ym. 2009). Karsitun rangan hakkuun tehotuntituotos oli puolestaan 10,50 m³ ja käyttötuntituotos 7,53 m³. Karsitulla rangalla muuntokertoimena käytettiin arvoa 1,393 (Kuitto ym. 1994, Ryyänen & Rönkkö 2001, Heikkilä ym. 2005, Kärhä ym.

2009). Tuloksista voidaan havaita molempien menetelmien tuottavuuden olevan hyvin lähellä toisiaan tässä tutkimusasetelmassa vallinneilla olosuhteilla. Samaa Fixteri FX15a -koneyksikköä tutkineet Nuutinen & Björheden (2013) määrittivät kokopuun paalauksen tuottavuuden tämän tutkimuksen kanssa lähes samalle tasolle.

Tutkimuksia karsitun rangan hakkuusta joukkokäsittelymenetelmällä, on tehty varsin vähän. Tehdyissä tutkimuksissa olosuhteet vaihtelevat keskenään paljon ja otoskoot ovat suhteellisen pieniä. Metsäteho ja Työtehoseura tutkivat vuonna 2011 Valmet 901.4 -harvesterin tuottavuutta rankapuun hakkuussa. Tutkimuksessa korjattiin yhteensä noin 110 m³ puuta, josta noin puolet oli lehtipuuta (Kärhä ym. 2011b). Poistuman keskikoko hakattaessa rankapuuta yhden kasan menetelmällä oli 57 dm³ ja joukkokäsiteltyjen puiden osuus oli noin 73 %. Hakkuun tehotuntituotos koko tutkimuksessa oli 11,5 m³. Em. tehotuntituotos on yhteenvedo kaikista tutkimuksessa olleista menetelmistä, ei vain rankapuun hakkuusta yhden kasan menetelmällä, millä tuottavuus oli noin 14,5 m³/h₀ (Kärhä ym. 2011b).

Metsäteho ja Metsähallitus tutkivat vuonna 2011 rankapuun hakkuuta Ponsse Ergo -harvesterilla, jossa oli Ponsse H7 -hakkuulaite. Menetelmää, jossa rankapuuta hakattiin joukkokäsittellen samaan kasaan, tutkittiin noin puolen hehtaarin aikaturkimuskoealalla. Poistumasta lähes puolet oli kuusta (Kärhä ym. 2011a). Koko tutkimuksessa korjattiin puuta 210 m³. Hakattaessa rankapuuta samaan kasaan poistuman keskikoko oli 58 dm³ ja joukkokäsiteltyjen puiden osuus oli noin 82 %. Koko tutkimuksen keskimääräinen tehotuntituotos oli 14,4 m³, mutta kuten Kärhän ym. (2011b) tutkimuksessa, tämä arvo sisältää myös muita menetelmiä kuin karsitun rangan hakkuu yhden kasan menetelmällä. Yhden kasan menetelmällä rankapuun hakkuun tehotuntituotos oli noin 14 m³ (Kärhä ym. 2011a).

Metsäntutkimuslaitoksen tutkimuksessa 2005 karsittua rankaa hakattiin yhteensä 3122 puusta 20 koealalta (Heikkilä ym. 2005). Joukkokäsiteltyjen puiden osuus oli 90,4 %. Keskimäärin rangan hakkuun ja metsäkuljetuksen tuottavuus oli 3,5 ja 17 m³/h₀. Metsäkuljetusmatka oli 250 m ja keskimääräinen kuormakoko rankapuulla

10,1 m³ (Heikkilä ym. 2005). Metsätehon aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna varsin alhaista tuottavuutta selittää poistuman pieni koko, sillä Heikkilän ym. (2005) tutkimuksessa poistettujen puiden keskijäreys oli vain 20 dm³.

5.2.2 Metsäkuljetus

Nyt kerätty metsäkuljetusaineisto oli suppea ja se sisälsi suhteellisen paljon normaalista työrutiinista poikkeavia toimenpiteitä. Nämä seikat huomioiden ei tuottavuusmallien laadinta aineiston pohjalta ollut järkevää vaan metsäkuljetuksen osuutta tuotantoketjun kilpailukyvyn määrittämisessä tarkasteltiin käyttäen apuna Kärhän ym. (2009), Laitilan ym. (2009) sekä Laitilan & Väätäisen (2011) tutkimuksia. Heidän mukaan kokopuiden tiivistämisen edut olivat selvät. Laitilan ym. (2009) mukaan kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus on noin kaksinkertainen verrattuna perinteisen kuitupuun metsäkuljetukseen paalien koon ollessa 0,5 m³ 300 m metsäkuljetusmatkalla. Tuolloin kokopuupaalikuorman koon oletettiin olevan 24 paalia, kun vastaava kuormakoko 5 metriä pitkän kuitupuun osalta oli 11,0 m³. Laitila ym. (2009) määrittivät kokopuupaalien metsäkuljetuksen käyttötuntituotoksen olevan noin 21 m³ kuormakoon ollessa 24 paalia. Kuormakoon tai paalin koon kasvattamisen todettiin nostavan metsäkuljetuksen tuottavuutta merkittävästi. Kärhän ym. (2009) tutkimuksessa kokopuupaalien metsäkuljetuksessa kuormakoon oletettiin olevan 22 paalia ja ajomatkan 300 m. Tuolloin metsäkuljetuksen tuottavuudeksi muodostui 23,8 m³ tehotunnissa ja metsäkuljetuskustannusten todettiin olevan noin 60 % alhaisemmat kuin ensiharvennuskuitupuun metsäkuljetuskustannukset.

Laitila ym. (2009) on laskenut pitkän kuitupuun metsäkuljetuksen tehotuntituotokseksi noin 13 m³ 300 m metsäkuljetusmatkalla, kun taas Kärhä ym. (2006a) esittää kuitupuun metsäkuljetuksen käyttötuntituotoksen harvennuksella olevan 11 m³ metsäkuljetusmatkan ollessa 250 m. Heikkilän ym. (2005) tutkimuksessa karsitun rangan metsäkuljetuksen tehotuntituotokseksi saatiin

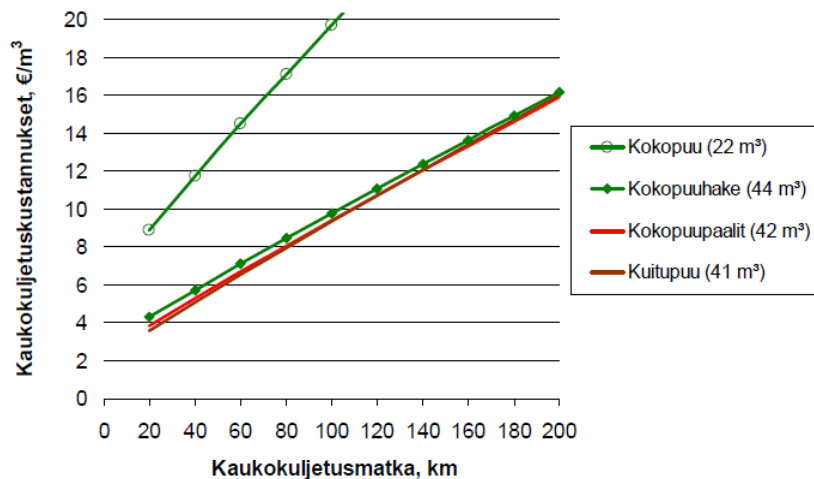
keskimäärin 17 m³ ja käyttötuntituotokseksi 14,2 m³, kun metsäkuljetusmatka oli 250 m.

Tässä tutkimuksessa karsitun rangan metsäkuljetuksen tehotuntituotokseksi saatiin 14 m³ 50 m metsäkuljetusmatkalla. Kuormatraktorin kuljettajan mukaan työtä hidasti se, että rangat olivat hakkuun jäljiltä monin paikoin ristikkäin ajouran varressa ja niiden kuormaamiseen kului sen vuoksi normaalia enemmän aikaa. Metsätehon ja Metsähallituksen tutkimuksessa 2011 havaittiin rankapuun metsäkuljetuksen tuottavuuden olevan hyvin lähellä perinteisen kuitupuun metsäkuljetuksen tuottavuutta (Kärhä ym. 2011a). Tuolloin kuorman koko rankapuulla oli keskimäärin 9,9 m³. Edellä mainittujen tutkimustulosten valossa kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuden voidaan sanoa olevan noin kaksinkertainen karsitun rangan metsäkuljetukseen verrattuna.

5.2.3 Kaukokuljetus

Tämän tutkimusaineiston pohjalta ei nähty tarvetta tutkia kokopuupaalien kaukokuljetuksen tuottavuutta ja kustannuksia, sillä aikaisemmissa tutkimuksissa (Kärhä ym. 2009, Laitila ym. 2009, Laitila & Väättäinen 2011) näitä asioita on jo tarkasteltu. Näissä tutkimuksissa paalit oli tehty Fixterin aiemmalla kehitysversiolla. Uuden FX15a:n valmistamat kokopuupaalit ovat ominaisuuksiltaan vanhempien paalien kanssa lähes samanlaisia, joten Kärhän ym. (2009), Laitilan ym. (2009) ja Laitilan & Väättäisen (2011) tutkimusten tulokset ovat edelleen relevantteja. Lisäksi edellä mainituissa tutkimuksissa otoskoko on ollut huomattavasti suurempi kuin mitä tämän tutkimuksen puitteissa oli mahdollista järjestää. Kokopuun paalauksen tuotantoketjun arvioinnissa käytettiin em. tutkimuksia kaukokuljetuksen osuuden laskemiseksi. Kärhän ym. (2009) ja Laitilan & Väättäisen (2011) mukaan kokopuupaalien ja kuitupuun kaukokuljetuskustannukset olivat lähellä toisiaan (kuva 42). Kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormausta ja purkua hidasti paalien lyhyydestä johtuva pieni taakkakoko. Kokopuupaaleja jouduttiin kuormaamaan puutavara-autoon useampia taakkoja kuin irtonaista, pitkää kuitupuuta. Useamman

nipun sitomiseen ja kuormaliinojen avaamiseen kului suhteellisesti enemmän aikaa. Lisäksi kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen kului enemmän aikaa kuin karsitulla kuitupuulla (Kärhä ym. 2009, Laitila & Väätäinen 2011). Tästä johtuen kuormauksen ja purkamisen ajanmenekit kokopuupaalien osalta olivat 46 % suuremmat verrattuna pitkän (5 m) kuitupuun vastaaviin ajanmenekkeihin (Laitila ym. 2009).



Kuva 42. Kokopuupaalien ja kuitupuun kaukokuljetuskustannukset ovat hyvin lähellä toisiaan riippumatta kaukokuljetusmatkasta. Edellisiin verrattuna kokopuuhakkeen kuljetuskustannukset ovat hieman korkeammat ja kokopuun kuljetuskustannukset selvästi korkeammat (Kärhä ym. 2009).

Laitila & Väätäinen (2011) oletivat autokuorman kooksi kokopuupaaleilla 100 paalia, yhteensä 2+4 nippua ja 5 m pitkän kuitupuun kuormakooksi 48 m³. Rangan kaukokuljetuskustannuksen todettiin olevan 0,2–0,3 €/m³ alempi verrattuna kokopuupaalien kaukokuljetuskustannuksiin (Laitila & Väätäinen 2011). Pitkän kuitupuun kuormauksen ja purkamisen ajanmenekit olivat 19 min ja 14,2 min, kun kokopuupaaleilla vastaavat luvut olivat 25,1 min ja 17,1 min (Laitila & Väätäinen (2011). Laitilan ym. (2009) mukaan keskimääräiset paalien kuormaus ja purkuajat olivat 16,3 ja 12,5 sekuntia. Kokopuupaalikuormien ajanmenekki oli 46 % suurempi kuin pitkän (5 m) kuitupuun ajanmenekki. Tämän arveltiin johtuvan pienestä taakkakoosta ja ajasta, jonka kokopuupaaleja kuormattaessa ja purkaessa jouduttiin käyttämään paikan siivoamiseen. Lisäksi kuorman sidonta ja kuormaliinojen avaaminen veivät enemmän aikaa suhteessa rangan kuormaukseen ja purkuun. Puutavara-autoa jouduttiin myös siirtämään varastolla useammin käsiteltäessä

kokopuupaaleja. Kuitupuukuorman pienen koon (38 m³) epäiltiin olevan osasyynä suureen eroon ajanmenekeissä kokopuupaalien ja kuitupuun kuormauksen ja purkamisen yhteydessä (Laitila ym. 2009).

5.2.4 Metsähakkeen tuotantoketju

Taulukossa 11 on vertailtu tämän tutkimuksen tulosten avulla kokopuun paalauksen ja karsitun rangan tuotantoketjun kustannuksia. Taulukossa esitetyt hakkuun tuottavuusarvot ovat tämän tutkimuksen Uuraisten tutkimushakkuun mukaiset. On huomattava, että kokopuupaalaimen hakkaamalla kuviolla poistuman keskikoko oli 37,3 dm³, kun taas kuviolla, josta hakattiin karsittua rankaa poistuman keskikoko oli 45,8 dm³. Aineiston pienuuden vuoksi ei ollut järkevää laatia tuottavuusmalleja, minkä vuoksi taulukossa 11 menetelmille on käytetty erisuuruisia poistuman tilavuuksia.

Taulukko 11. Uuraisten hakkuiden tuloksista laskettu metsähakkeen tehdashinta tutkituilla menetelmillä.

| Kustannustekijä | Kokopuun paalaus | Karsittu ranka | |
|---|-------------------------------|-------------------|------------------|
| Kantohinta, €/m ³ | 12 | 12 | ▼ ⁽¹⁾ |
| Hankinnan yleiskulut, €/m ³ | 3 | 3 | ▼ ⁽¹⁾ |
| Hakkuu | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 100 | 90 | |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 6,7 | 7,53 | |
| Kustannus, €/m ³ | 14,9 | 12 | |
| Lähikuljetus , 300m, kertymä 60 m ³ /ha | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 75 | 75 | ▼ ⁽²⁾ |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 21 | 13,5 | ▼ ⁽⁴⁾ |
| Kustannus, €/m ³ | 3,6 | 5,6 | |
| Kaukokuljetus , 100 km | | | |
| Kustannus, €/m ³ | 8 | 7,7 | ▼ ⁽²⁾ |
| Haketus , terminaali, €/m ³ | 3 | 3 | ▼ ⁽²⁾ |
| Terminaalitoiminnot , €/m ³ | 1 | 1 | ▼ ⁽²⁾ |
| Kuljetus terminaalista tehtaalle , 15 km, €/m ³ | 2,6 | 2,6 | ▼ ⁽²⁾ |
| Yhteensä , €/m ³ | 48,1 | 46,8 | |
| (1) Arvio | (2) Laitila & Väättäinen 2011 | | |
| (2) Kärhä ym. 2009 | (4) Laitila ym. 2009 | | |

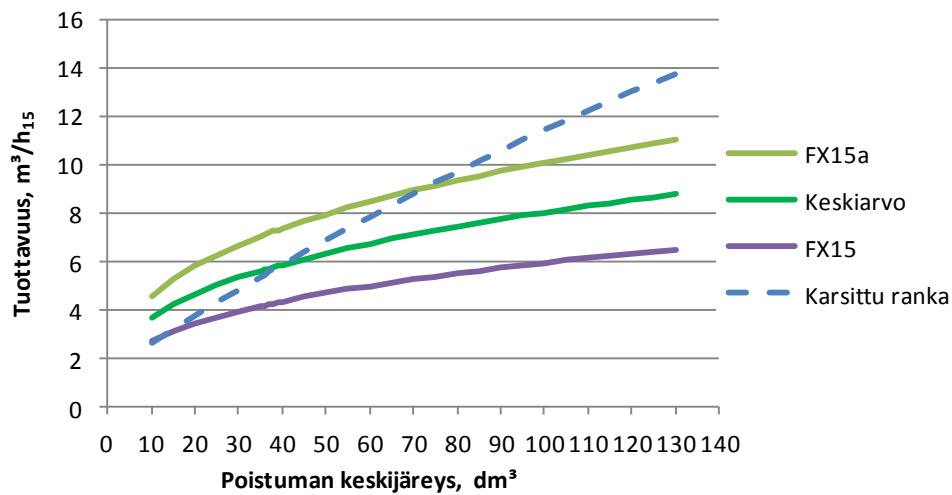
Rangan hakkuun tehdashinta on 1,3 €/m³ alhaisempi. Hakatut kuviot eivät olleet lähtöpuustoltaan samankaltaisia, joten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Poistuman suurempi keskikoko rangan hakkuussa nostaa hakkuun tuottavuutta ja alentaa siten hakkuun yksikkökustannuksia. Yksikkökustannukset on laskettu jakamalla käyttötuntikustannus käyttötuntituotoksella. Tämän vertailun perusteella ei voida sanoa toisen menetelmän olevan selvästi toista kilpailukykyisempi.

Hakattaessa pienpuuta Fixteri-kokopuupaalaimella myös alikasvospuut paalataan muun ainespuun kanssa, jolloin hehtaarikohtainen kertymä kasvaa, eikä ennakkoraivauksesta aiheudu lisäkustannuksia. Uuraisten tutkimusalalla alikasvospuiden ja latvus- ja oksamassan paalaaminen nosti kertymää laskennallisesti 7,33 m³/ha. Laskemalla yhteen kaikki tuotantoketjun aikana syntyvät kustannukset saatiin selville metsähakkeen kokonaistuotantokustannukset. Taulukosta 12 ilmenee, mitkä kustannustekijät ovat tämän tutkimuksen vertailussa otettu huomioon. Hakkuun tuottavuus on laskettu molemmille menetelmille 40 dm³ poistuman koolla. Laskelmassa FX15a-paalaimen tuottavuus on laskettu yhdistämällä tämän ja Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimustulokset. Molemmissa em. tutkimuksissa käytettiin samaa FX15a-paalainyksikköä ja Logman 811FC -alustakonetta. Myös koneen kuljettaja oli sama. Rangan hakkuun tuottavuuden laskennassa on käytetty perustasona viiden eri tutkimuksen tuloksia kuitupuun yksinpuinhakkuusta. Joukkokäsittelyyn, karsitun rangan hakkuun tuottavuus on johdettu suhteuttamalla Kärhän ym. (2011b & 2012) aikatutkimustulokset aikaisempiin tuloksiin kuitupuun yksinpuinhakkuusta (Rajamäki ym. 1996, Kärhä ym. 2006a, Nurminen ym. 2006). Hakkuun ja metsäkuljetuksen yksikkökustannukset laskettiin jakamalla koneen käyttötuntikustannus käyttötuntituotoksella. Taulukosta 12 nähdään kokopuun paalauksen olevan kilpailukykyinen menetelmä kun poistuman koko on 40 dm³ kokopuuta.

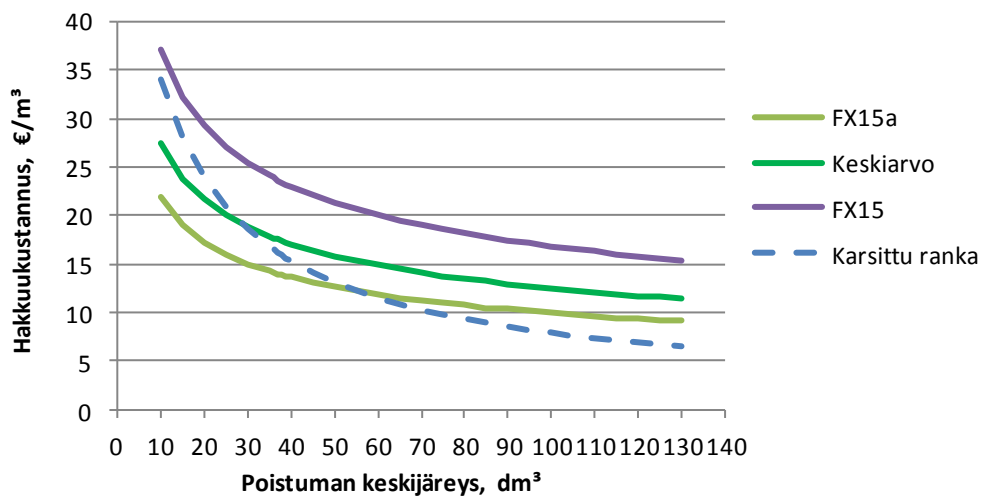
Taulukko 12. Kokopuun paalaus on kilpailukykyinen menetelmä poistuman keskikoon ollessa 40 dm³ kokopuuta.

| Kustannustekijä | Kokopuun paalaus | Karsittu ranka | |
|---|------------------------------|-----------------------|------------------|
| Kantohinta, €/m ³ | 12 | 12 | ▼ ⁽¹⁾ |
| Hankinnan yleiskulut, €/m ³ | 3 | 3 | ▼ ⁽¹⁾ |
| Hakkuu | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 100 | 90 | |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 7,4 | 5,9 | |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 13,6 | 15,3 | |
| Lähikuljetus , 300 m, kertymä 60 m ³ /ha | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 75 | 75 | ▼ ⁽²⁾ |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 21 | 13,5 | ▼ ⁽⁴⁾ |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 3,57 | 5,56 | |
| Kaukokuljetus , 100 km | | | |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 8 | 7,7 | ▼ ⁽³⁾ |
| Hakeus , terminaali, €/m ³ | 3 | 3 | ▼ ⁽³⁾ |
| Terminaalitoiminnot , €/m ³ | 1 | 1 | ▼ ⁽³⁾ |
| Kuljetus terminaalista tehtaalle , 15 km, €/m ³ | 2,6 | 2,6 | ▼ ⁽³⁾ |
| Yhteensä , €/m ³ | 46,7 | 50,2 | |
| (1) Arvio | (3) Laitila & Väätäinen 2011 | | |
| (2) Kärhä ym. 2009 | (4) Laitila ym. 2009 | | |

Kuvista 43 ja 44 nähdään, miten hakkuun tuottavuus ja hakkuukustannus muuttuvat eri menetelmien välillä poistuman koon vaihdellessa. FX15a-koneen tuottavuus on rangan hakkuuta korkeampi poistuman keskikoon ollessa alle 70 dm³. FX15a:n ja seurantakoneen keskiarvokäyrä leikkaa karsitun rangan käyrän poistuman koon ollessa 40 dm³. Kokopuupaalien hakkuukustannukset jäivät karsitun rangan hakkuun kustannuksia alhaisemmiksi FX15a:lla, kun poistuman keskikoko oli alle 55 dm³. Keskiarvokäyrä leikkaa karsitun rangan käyrän kohdassa 25 dm³. FX15-seurantakoneen tuottavuus ylittää karsitun rangan hakkuun tuottavuuden ainoastaan poistuman keskikoon ollessa 10 dm³. FX15-seurantakoneen hakkuukustannukset ovat rankahakkuun kustannuksia suuremmat riippumatta poistuman keskikoosta.

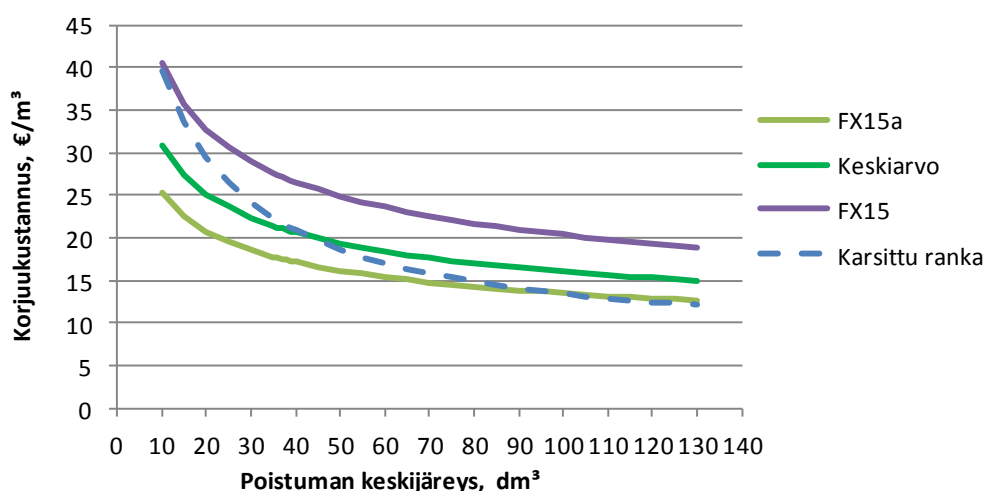


Kuva 43. Hakkuun tuottavuus suhteessa poistuman keskikokoon eri menetelmillä. Karsitun rangan ja FX15a käyrien leikkauspiste on kohdassa 70 dm³.



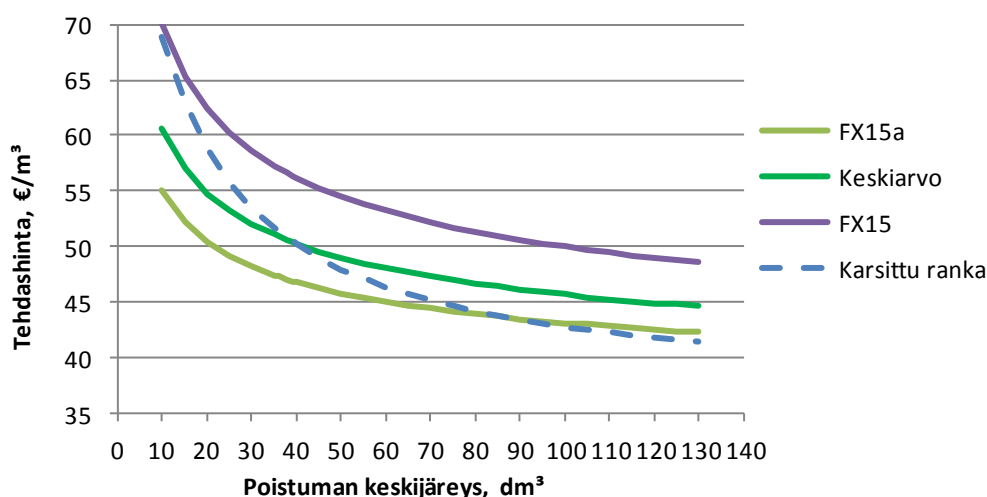
Kuva 44. Hakkuukustannus suhteessa poistuman keskikokoon eri menetelmillä. Karsitun rangan ja FX15a käyrien leikkauspiste on kohdassa 55 dm³.

Kuvasta 45 voidaan havaita kokopuun paalauksen korjuukustannusten FX15a-paalainyksiköllä olevan karsitun rangan korjuukustannuksia alhaisempi poistuman keskikokoon ollessa alle 95 dm³. Seurantakoneen korjuukustannukset ovat esitetyistä menetelmistä suurimmat riippumatta poistuman koosta.



Kuva 45. Korjuukustannukset suhteessa poistuman keskikokoon eri menetelmillä. FX15a ja karsitun rangan käyrien leikkauspiste on kohdassa 95 dm³.

Tarkasteltaessa koko metsähakkeen tuotantoketjua voidaan havaita, että FX15a:n kokonaistuotantokustannukset ovat karsitun rangan hakkuun tuotantokustannuksia alhaisemmat poistuman koon ollessa alle 85 dm³ (kuva 46). FX15a:n ja seurantakoneen tuotantokustannuksista laskettu keskiarvokäyrä leikkaa karsitun rangan käyrän poistuman keskikokoon ollessa 40 dm³. Seurantakoneen ja karsitun rangan käyrät eivät leikkaa millään poistuman keskikoolla.



Kuva 46. Kokonaistuotantokustannukset suhteessa poistuman keskikokoon eri menetelmillä. FX15a ja karsitun rangan käyrien leikkauspiste on kohdassa 85 dm³. Keskiarvokäyrä leikkaa karsitun rangan käyrän kohdassa 40 dm³.

Energiasisältöön perustuva tehdashinta laskettiin eri menetelmille vaihdellen poistuman keskikokoa ja metsähakkeen raaka-aineen kosteutta. Hakkeen tehollinen lämpöarvo johdettiin kaavasta 1 (Ala-Kangas 2013):

$$q_{p,net,ar} = q_{p,net,d} * \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0,0244 * M_{ar} \quad (\text{Kaava 1})$$

jossa:

$q_{p,net,ar}$ = tehollinen lämpöarvo saapumistilassa (MJ/kg)

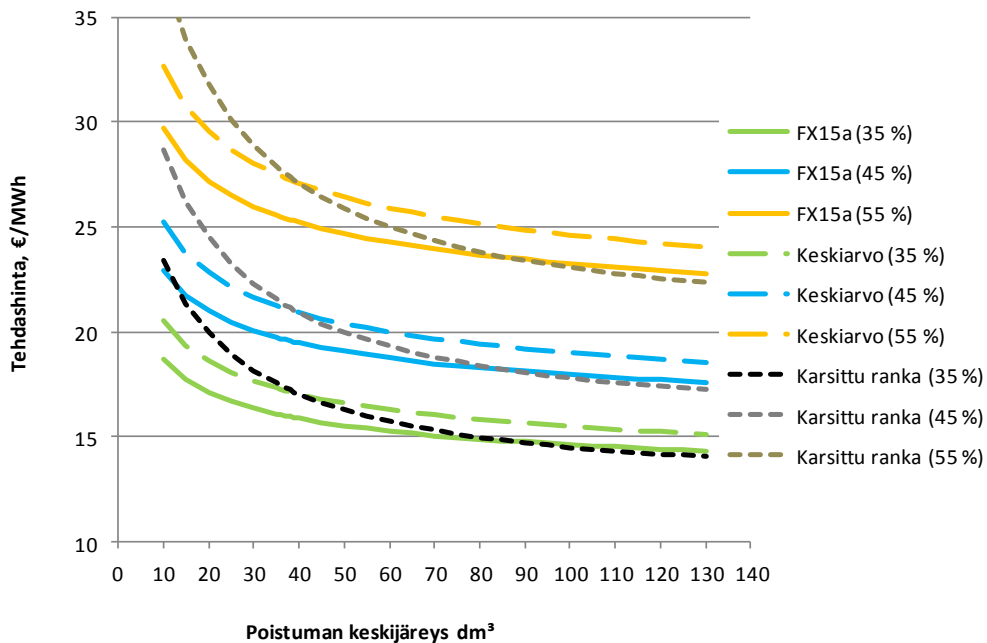
$q_{p,net,d}$ = kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo vakiopaineessa (MJ/kg)

M_{ar} = kosteus (p-%)

0,02443 = veden (kosteuden) höyrystymisentalpian korjaustekijä
(vakiopaineessa) 25 °C:ssa [MJ/kg 1 p-% kosteutta kohti]

Hakkeen tehollisena lämpöarvona vakiopaineessa käytettiin arvoa 19,6 MJ/kg (Ala-Kangas 2000). Toimitettu energiamäärä (MWh/m³) johdettiin tehollisesta lämpöarvosta (MJ/kg) muuntokertoimella 3,6 (Ala-Kangas 2000).

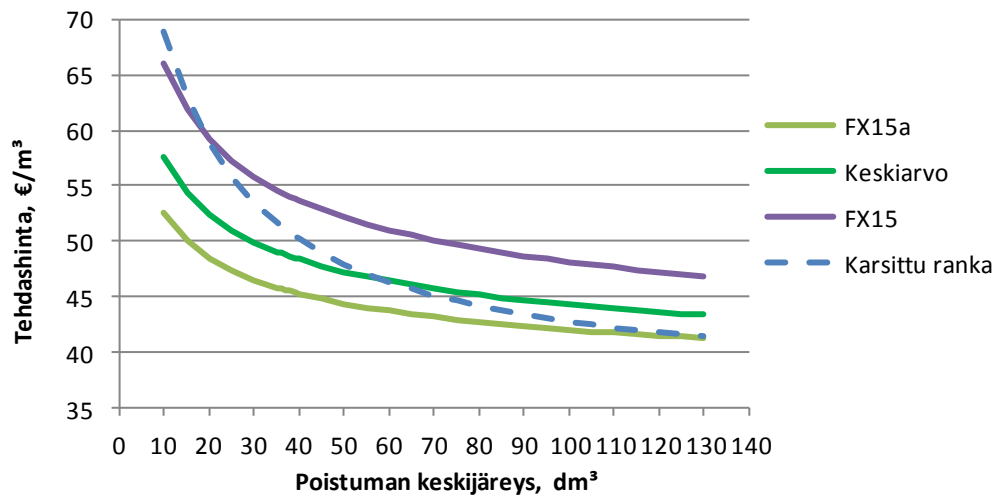
Energian tehdashinta laskettiin jakamalla aiemmin laskettu puun tehdashinta €/m³ puukuution energiasisällöllä. Kuva 47 esittää energian tehdashinnan poistuman koon vaihdellessa. Kokopuun paalauksen havaittiin olevan kilpailukykyinen menetelmä, kun poistuman keskikoko oli alle 85 dm³ ja kokopuupaalien sekä rankojen kosteus 35 %.



Kuva 47. Kokonaistuotantokustannukset eri menetmillä poistuman keskikoon ja metsähakkeen raaka-aineen kosteuden vaihdellessa. Puutavaralajin kosteusprosentti esitetty sulkeissa.

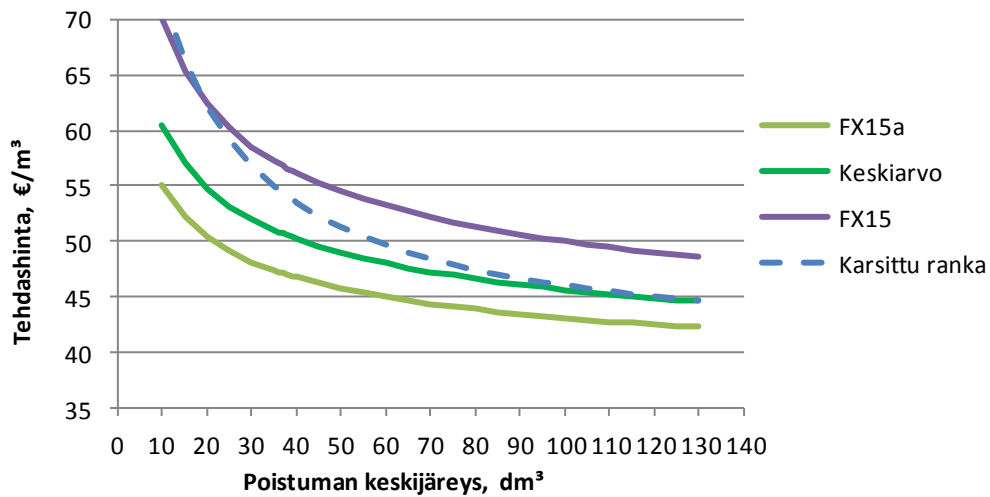
5.2.5 Energiatuen ja ennakkoraivauksen vaikutus kustannuksiin

Mahdollinen energiatuki koneyksikön hankinnassa alentaa kokopuupaalaimen laskennallisia käyttötuntikustannuksia merkittävästi. Tuen ollessa 30 % on koneyksikön laskennallinen käyttötuntikustannus 89 €/h, kun ilman tukea käyttötuntikustannus on 100 €/h. Pienentyneen käyttötuntikustannuksen vaikutus tuotantoketjun kokonaiskustannuksiin käy ilmi kuvasta 48. Verrattaessa kuvia 46 ja 48 huomataan energiatuen kasvattavan kokopuun paalauksen potentiaalista käyttöaluetta. Pienentynyt käyttötuntikustannus laskee kokopuupaalihakkeen tehdashintaa 1,5 €.

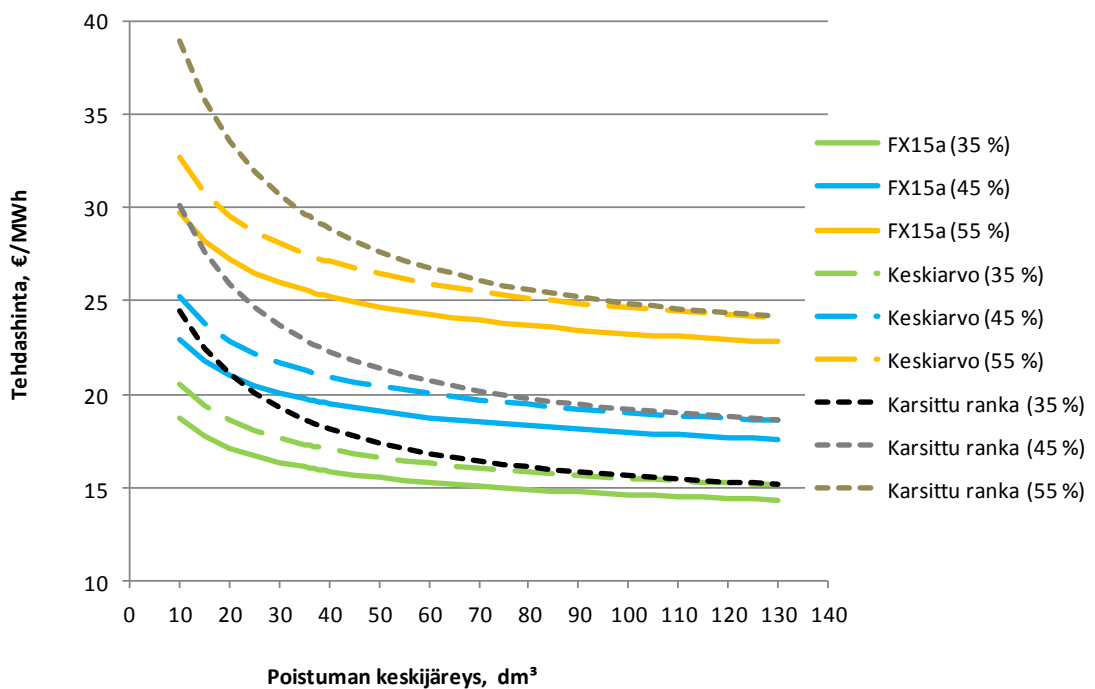


Kuva 48. Kokonaistuotantokustannukset kokopuupaalaimen käyttötuntikustannuksen ollessa 89 €/h. Kokopuupaalihakkeen tehdashinta on rankahakkeen tehdashintaa edullisempi riippumatta poistuman koosta. FX15a:n FX15 keskiarvokäyrä leikkaa karsitun rangan käyrän poistuman koolla 55 dm³.

Ennakkoraivaustarve kasvattaa kilpailevien menetelmien kustannuksia. Jos oletetaan ennakkoraivauskustannusten olevan 200 €/ha ja hakkuukertymän 60 m³/ha, aiheutuu ennakkoraivauksesta 3,3 €/m³ lisäkustannus. Kuvista 49 ja 50 havaitaan ennakkoraivauskustannusten vaikutus tuotantoketjujen kokonaistuotantokustannuksiin.



Kuva 49. Kokopuun paalaus FX15a-paalainyksiköllä on edullisin menetelmä riippumatta poistuman keskitilavuudesta, kun rankahakkuun ennakkoraivauskustannukset (3,3 €/m³) on otettu huomioon. Myös FX15a ja FX15-seurantakoneen keskiarvo pysyttelee rankahakkuuta edullisempänä kaikilla tarkastelluilla poistettujen puiden tilavuuksilla.

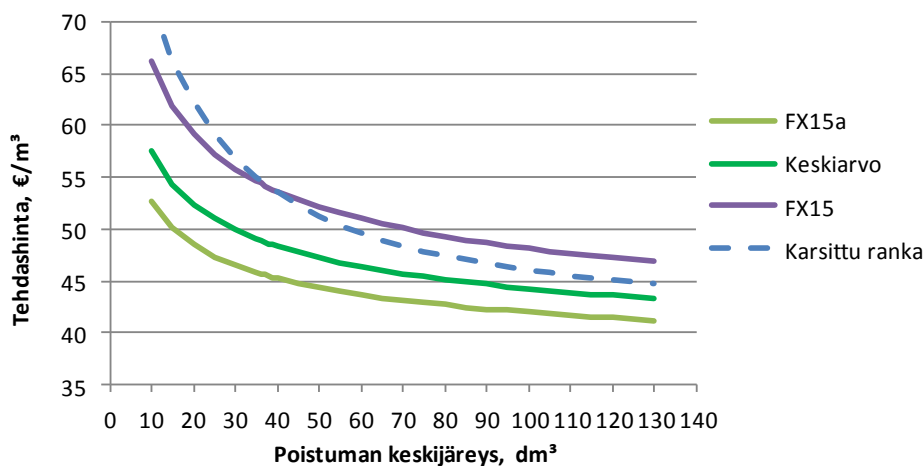


Kuva 50. Kokopuun paalaus FX15a-paalainyksiköllä on edullisin menetelmä riippumatta poistuman keskijäreystä, kun rankahakkuun ennakkoraivauskustannukset (3,3 €/m³) ja puutavaran kosteus- % (35 %) on otettu huomioon.

Energiatuki ja ennakkoraivauskustannus yhdessä, laskevat kokopuun paalauksen tuotantokustannukset selvästi rankahakkuun kustannuksia alhaisemmiksi. Poistuman keskikoon ollessa 40 dm³ on menetelmien ero tehdashinnassa 7,6 €/m³. Taulukon 13 laskennassa on otettu huomioon pienentynyt käyttötuntikustannus ja rankahakkuun ennakkoraivauskustannus. Kuva 51 osoittaa energiatuen ja ennakkoraivauskustannusten laajentavan kokopuun paalauksen taloudellisesti kannattavaa käyttöaluetta aikaisempaa järeämpipuustoisille kohteille.

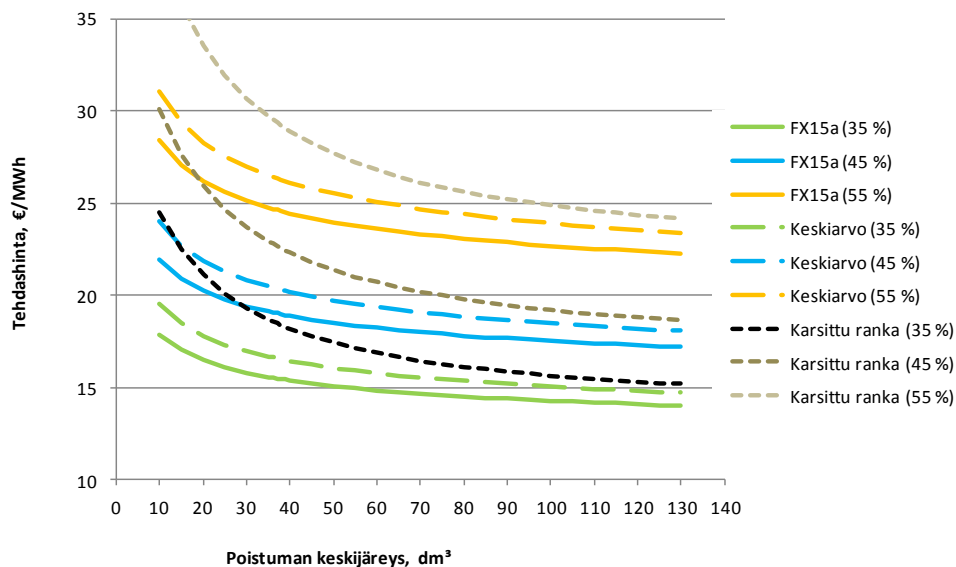
Taulukko 13. Energiainvestointituen (30 %) ja ennakkoraivauskustannuksen vaikutukset kokonaistuotantokustannuksiin poistuman keskikoolla 40 dm³.

| Tuotantoketjujen kokonaistuotantokustannukset | | | |
|--|-------------------------|-----------------------|------------------|
| Kustannustekijä | Kokopuun paalaus | Karsittu ranka | |
| Kantohinta, €/m ³ | 12 | 12 | ✓ ⁽¹⁾ |
| Hankinnan yleiskulut, €/m ³ | 3 | 3 | ✓ ⁽¹⁾ |
| Ennakkoraivauskustannus, €/m ³ | - | 3,3 | |
| Hakkuu | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 89 | 90 | |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 7,4 | 5,9 | |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 12,1 | 15,3 | |
| Lähikuljetus, 300 m, kertymä 60 m³/ha | | | |
| Käyttötuntikustannus, €/h ₁₅ | 75 | 75 | ✓ ⁽²⁾ |
| Tuottavuus, m ³ /h ₁₅ | 21 | 13,5 | ✓ ⁽⁴⁾ |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 3,57 | 5,56 | |
| Kaukokuljetus, 100 km | | | |
| Yksikkökustannus, €/m ³ | 8 | 7,7 | ✓ ⁽³⁾ |
| Hake tus , terminaali, €/m ³ | 3 | 3 | ✓ ⁽³⁾ |
| Terminaalitoinnot , €/m ³ | 1 | 1 | ✓ ⁽³⁾ |
| Kulje tus terminaalista tehtaalle , 15 km, €/m ³ | 2,6 | 2,6 | ✓ ⁽³⁾ |
| Yhteensä , €/m ³ | 45,3 | 53,5 | |



Kuva 51. Energiatuen ja ennakkoraivauskustannusten vaikutuksesta FX15a ja karsitun rangan käyrä, eivät laskennallisesti leikkaa millään poistuman keskikoolla.

Kuvan 52 laskennassa on otettu huomioon kokopuupaalaimelle myönnetty energiatuki ja rankahakkuun ennakkoraivauskustannus. Kun kokopuupaalien ja rankojen kosteus on 35 %, on kokopuun paalaus edullisempää riippumatta poistuman koosta, jos kokopuupaalit kuivuvat tienvarsivarastoinnin aikana riittävän kuivaksi.



Kuva 52. Kokonaistuotantokustannukset eri menetelmillä poistuman keskikoon ja metsähakkeen raaka-aineen kosteuden vaihdellessa. Laskennassa on otettu huomioon kokopuupaalaimelle myönnetty energiatuki ja rankahakkuun ennakkoraivauskustannus.

5.2.6 Uusien painorajojen vaikutus kaukokuljetukseen

Vuonna 2013 lokakuun alussa nousseet raskaiden ajoneuvojen suurimmat sallitut mitat ja massat vaikuttavat myös puutavaran kaukokuljetukseen. Tavoitteena uudella asetuksella on laskea kuljetusten yksikkökustannuksia. Ennen uutta asetusta ajoneuvojen suurin sallittu korkeus oli 4,2 m ja suurin sallittu kokonaismassa 60 t. Uuden asetuksen voimaantulon myötä suurin sallittu korkeus on 4,4 m ja suurin sallittu kokonaismassa 76 t (Kilpailukykyä parannetaan... 2013). Aikaisemmissa tutkimuksissa kokopuupaalien autokuorman kooksi on oletettu 90 tai 100 paalia, kun paaleja on kuljetettu vakiorakenteisella puutavara-autolla. Paalien kaukokuljetuksen niukan tutkimuksen vuoksi ei ole selvää, päästäänkö paalien autokuljetuksessa hyödyntämään puutavara-auton koko kantavuus. Tässä tutkimuksessa paalien keskimääräinen massa oli 502,2 kg. Jos paalin kosteuden oletetaan olevan 30 % tienvarsivarastossa yhden kuivumiskauden jälkeen, voidaan arvio paalin massasta johtaa energiapuun (mänty) kuivatuoretiheydestä (kaava 2) (Lindblad ym. 2013):

$$r_g = 100 \times r_{0,g} / (100 - u), \quad (\text{Kaava 2})$$

jossa:

r_g = tuoretiheys, $r_{0,g}$ = kuivatuoretiheys ja u = kosteus.

Täten tuoretiheydeksi 30 % kosteudella saadaan 550 kg/m^3 ja yksittäisen paalin painoksi 276,1 kg. Jos puutavara-auton omamassaksi oletetaan 25 000 kg ja kuormakooksi 100 paalia, niin ajoneuvon kokonaismassa olisi 52 610 kg. Tällä tavoin laskettuna kokopuupaalien autokuljetuksessa ei päästä täysiin hyötykuormiin, vaan kantavuutta jää käyttämättä yli 7 000 kg lokakuussa 2013 väistyneellä lakiasetuksella. Uusilla painorajoilla täyden hyötykuorman saavuttamiseksi täytyisi paaleja kuormata ajoneuvon epärealistiset n. 180 kpl. Nykyisellä paalin pituudella (2,6 m) voidaan kuormaan kasata maksimissaan 6 nippua, kaksi vetoautoon ja 4 perävaunuun. Mikäli oletetaan yhden nipun sisältävän 18 paalia, olisi koko kuormassa 108 paalia, jolloin ajoneuvon kokonaismassa olisi noin 55 000 kg.

Kokopuupaaleja on kuljetettu perinteisen puutavara-auton lisäksi umpilaidallisella energiapuuautolla. Ladottaessa paalit energiapuuautoon samansuuntaisesti, kuten puutavara-autoon, mahtuu autotyypin kuormatilaan sama määrä paaleja.

Kokopuupaalit tehdään tällä hetkellä 2,6 m pitkiksi, minkä vuoksi ne eivät mahdu energiapuuautoon muuten kuin pituussuunnassa. Tutkimuksessa selvitettiin laskennallisesti 20 cm lyhyemmän paalin vaikutuksia toimitusketjun yksikkökustannuksiin. Mikäli paalit valmistettaisiin 2,4 m pituuteen, voitaisiin niitä kasata energiapuuauton kuormatilaan poikittain ajoneuvon kulkusuuntaan nähden. Tällöin nippujen väliin tai kuormatilan päihin ei jäisi tyhjää tilaa, vaan koko kuormatilan tilavuus voitaisiin hyödyntää. Käyttäen yhden paalin poikkileikkauspinta-alaa, voidaan laskea paalien lukumäärä energiapuuauton kuormatilassa, kun 2,4 m paaleja kasataan poikittain. Paalin poikkileikkauspinta-ala laskettiin jakamalla puutavara-auton kuormatilan poikkileikkauspinta-ala (7,5 m²) nipussa olevien paalien lukumäärällä (18 kpl), jolloin yhden paalin poikkileikkauspinta-alaksi muodostui 0,42 m². Jos oletetaan uusien asetusten myötä energiapuuauton kuormatilan korkeuksien ja pituuksien olevan vetoautossa 3,22 m ja 6,99 m sekä perävaunussa 3,3 m ja 12,8 m, niin kuormatilan pinta-alaksi saadaan 64,7 m². Näin ollen paaleja mahtuisi kuormaan 155,4 kpl, joka on huomattavasti suurempi määrä kuin puutavara-auton kuormakoko (108 paalia). Tuolloin kuormatun ajoneuvon kokonaispainoksi tulisi 72 104,1 kg. Tämä on lähellä uuden asetuksen mukaista suurinta sallittua 76 t painorajaa. Laskelmassa käytetty 2,4 m pituisen paalin paino johdettiin 2,6 m pitkän paalin pituuden ja painon suhteesta. Paalin painon oletettiin olevan 254,9 kg 30 % kosteudessa ja energiapuuauton omapainon 32 500 kg.

Tekemällä paaleista 20 cm lyhyempiä päästäisiin kokopuupaalien kaukokuljetuksessa ajamaan lähes täysiä hyötykuormia. Lisäksi kuljettaessa paaleja umpilaidallisella energiapuuautolla, kuormauksen ja kuorman purun ajanmenekeistä jää kokonaan pois pankkojen käsittely ja kuorman sitominen ja kuormaliinojen avaus. Toisaalta paalien kuormauksessa ja purussa taakkakoko pienenee lyhyemmän paalin myötä, mikä nostaa kuormauksen ja purkamisen ajanmenekkejä. Laskelmassa

kaukokuljetusmatkan oletettiin olevan 100 km. Vaikutukset kaukokuljetuksen yksikkökustannuksiin laskettiin Laitilan ym. (2009) ja Nurmisen & Heinosen (2007) ajanmenekkimalleilla (liitteet 1 ja 2).

Laskennallisesti paalin lyhentämisellä ei kuitenkaan saavutettu kustannussäästöjä kokopuupaalien kaukokuljetuksessa suhteessa karsitun rangan kaukokuljetukseen, sillä pienempi taakkakoko nosti kuormauksen ja kuorman purun ajanmenekkejä enemmän, kuin mitä kuormakoon kasvattamisesta hyödyttiin. Toisaalta laskelma osoitti, että tavalla, jossa kuljetetaan 2,4 m pitkiä paaleja, uuden asetuksen mukaisella energiapuuautolla, voidaan kaukokuljetuksen yksikkökustannuksia alentaa noin 1,6 eurolla verrattuna tapaan, jossa nykyisen pituisia (2,6 m) paaleja kuljetetaan uuden asetuksen mukaisella puutavara-autolla. Paalin pituuden lyhentäminen 20 cm:llä laskee metsäkuljetuksen tuottavuutta jonkin verran, sillä lyhyempien paalien vuoksi kuorman tilavuus laskee noin yhden kuutiometrin. Vaikutuksen ei kuitenkaan oletettu alentavan paalien metsäkuljetuksen tuottavuutta, kuin noin yhden kiintokuutiometrin verran, jolloin vaikutukset metsäkuljetuksen yksikkökustannuksiin jäivät varsin pieniksi. Laskennan perusteella voidaan todeta paalin lyhentämisen 2,4 m:iin laskevan kokopuun paalauksen tuotantoketjun kokonaiskustannuksia noin eurolla. Paalin lyhentäminen vaikuttanee myös perävaunun peräosan kuormaukseen ja purkuun. Myös kokopuupaalikasojen pystyssä pysyminen tienvarsivarastolla voi muodostua ongelmaksi lyhemmillä paaleilla.

5.3 Tulosten arviointi

Tarkasteltaessa kustannuslaskelmia on huomioitava, että niiden pohjalla on tässä ja Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa mitatut tuottavuusoletukset FX15a-paalaimelle. Näissä tutkimuksissa korjuuolosuhteet ovat olleet hyvin samankaltaisia ja otoskoko suhteellisen pieni. Näin ollen uutta FX15a-paalainyksikköä on tutkittu vain lähes puhtaassa männikössä hyvin kantavalla kivennäismaalla.

Huonosti kantavilla turvemailla ajouran havutuksen poisjäänti voi aiheuttaa korjuuvaurioita ja täten rajoittaa potentiaalisia korjuukohteita. Molemmissa tutkimuksissa käytettiin samaa koneyksikköä ja koneenkuljettajaa, joten kuljettajien ja kohteiden välistä vaihtelua ei tässä saatu selville. Niin tämän kuin aikaisempienkin tutkimusten tulosten yleistettävyyttä rajoittaa suppea ja yksipuolinen aineisto. Toisin kuin rankahakkuussa kuljettajien kokemus on rajoittunut vain tiettyyn paalainyksikköön. Tähän asti jokaisen valmistetun Fixteri-paalainyksikön kokoonpanoon ovat vaikuttaneet uusin tuotekehitys ja uuden koneyrittäjän toiveet, eikä eri paalainyksikköjen käsittely koneenkuljettajilta onnistu ongelmitta ilman pitkää totuttelujaksoa. Tämä saattaa vaikeuttaa maksimaalisen tuottavuuden saavuttamista.

Aikatutkimuskoealoilla eri menetelmillä lähtöpuusto oli erilaista, mikä heikentää kokopuun paalauksen ja karsitun rangan hakkuun vertailua keskenään. Lisäksi FX15a hakkasi hieman suosituksia ja vertailukonetta kapeampaa hakkuurintamaa, mikä nostaa hakkuun tuottavuutta, kun käsiteltäviä puita ei poimita työskentelyalueen ääri laidoilta. FX15a:n ja seurantakone FX15:n vertailua rajoittaa koneyksiköiden rakenteellisen erilaisuus. FX15 on FX15a-sarjatuotantokonetta edeltävä prototyyppi. On myös huomattava, että lukuun ottamatta Uuraisten tutkimushakkuun kustannuslaskentaa, on karsitun rangan hakkuun tuottavuuden perustana kirjallisuudesta löytyvät tuottavuustutkimukset, eikä Uuraisilla työskennelleen harvesterin tuottavuus.

Tämän tutkimuksen puitteissa ei löydetty yksiselitteistä syytä sille, miksi FX15a-mallin ja FX15-seurantakoneen hakkuun tuottavuudet eroavat niin merkittävästi toisistaan. On selvää, että uusi FX15a-malli on edeltäjänsä suorituskykyisempi, mutta mitatut koneiden tuottavuuserot ovat hyvin eritasoiset, seurantakoneen tuottavuuden ollessa vain hieman Fixteri II -mallia korkeampi. Seurantakoneen kuljettajan lyhyehkö kokemus työmenetelmästä ja leimikkojen tyyppi sekä normaalista poikkeava hakkuuohjeistus selittää osaltaan seurantakoneen alhaista tuottavuutta. FX15a:n koealat ovat olleet niin tässä kuin Nuutisen & Björhedenin (2013) tutkimuksessa testiluonteisia ajoja. FX15a-koneelta puuttuu

FX15-konemallin tapainen seuranta-aineisto. Tämä aineisto toisi varmuuden FX15a:n käyttötuntituotostasoon.

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen yhteydessä ensimmäistä kokopuupaalikuormaa tuotaessa varastolle takimmainen paalirivi sortui ja paalit putosivat maahan kuormatraktorin taakse. Etummaisen paalirivin estäessä kuljettajan näkyvyyden koneen taakse, ei pudonneita paaleja voitu kuormata takaisin kuormatilaan, vaan kuorma ajettiin vajaana varastopaikalle ja pudonneet paalit kuormattiin seuraavaan kuormaan. Tämän vuoksi kokopuupaalien metsäkuljetuksessa ajettiin yhteensä 3 kuormaa, joista vain keskimäinen kuorma oli täysi. Purettuaan ensimmäisen kuorman, kuljettaja nosti muutamia pitkiä rankoja kuormatilan pohjalle. Tällä pyrittiin pidentämään kuormatilan pohjaa ja estämään takimmaisen paalirivistön sortuminen jäljellä olevilla kuormilla. Rankojen metsäkuljetuksessa ajettiin ongelmitta yksi täysi ja toinen vajaa kuorma.

Kokopuupaalikuormaa purettaessa paalit punnittiin yksitellen kuormainvaa'alla. Tämän työsuorituksen ajanmenekin tarkka erottaminen kuorman purkamisesta osoittautui lähes mahdottomaksi, joten paalien punnitseminen sisältyy purkuvaiheeseen. Monet ensimmäisestä kuormasta pudonneet paalit hajosivat sidonnan pettäessä viimeistään kuorman purkuvaiheessa. Näin ollen ylimääräistä aikaa kului, kun kuljettaja joutui pyörittelemään paaleja, että työntutkija näkisi mikä numeroitu paali oli kyseessä. Hajonneiden paalien purkuun kului ilman paalien tunnistamistakin enemmän aikaa kuin ehjän paalin purkuun, sillä hajonneita tai löysiä paaleja oli vaikea käsitellä. Paalainyksikön sidonta ei ollut toiminut hakkuun aikana oikealla tavalla, minkä vuoksi sidontaverkkoa ei ollut kiertynyt valmiin paalin ympärille riittävästi (kuva 53).



Kuva 53. Sidontaverkkoa ei ole kierretty riittävästi valmiin paalin ympärille. Tämän seurauksena monet paaleista hajosivat metsäkuljetuksen yhteydessä.

Lisäksi kokopuupaalit olivat käytetylle kuormatraktorille uusi puutavaralaji, mistä johtuen kuljettaja joutui suorittamaan satunnaisotantomittauksia ensimmäisen kuorman purun aikana yhteensä viiden taakan kohdalla. Satunnaisotantojen osuminen tutkimusasetelmaan lisäsi ensimmäisen kuorman purun ajankäyttöä. Edellä esitetyt seikat huomioiden täytyy todeta, etteivät tämän tutkimuksen maastomittauksissa selvitetty metsäkuljetuksen tuottavuus tai työvaiheiden ajanmenekit edusta normaalin työskentelyrutiinin mukaista työskentelyä, eikä niitä tästä johtuen otettu huomioon kustannuslaskelmissa. Lisäksi laskelmissa käytetyt kaukokuljetuksen tähänastiset tutkimukset perustuvat suppeisiin vertailututkimuksiin, mikä rajoittaa näiden tulosten yleistettävyyttä.

5.3.1 Videoanalyysin soveltuvuus tuottavuustutkimukseen

Perinteisesti työntutkija on kellottanut maastossa jokaisen työvaiheen ajanmenekit koneen työskennellessä hakkuutyömaalla (Nuutinen 2013). Tämä vaatii kokeneeltakin työntutkijalta vahvan rutiinin kellotuksen käytännön suorituksesta. Kuvaustekniikan kehittymisen myötä työntutkimuksessa hyödynnetään yhä enemmän videointia. Videoanalyysin eduksi voidaan lukea yksinkertaiset ja helpot järjestelyt maastossa. Koneen työskentely kuvataan videolle siten, että kaikki

työvaiheet voidaan tarkistaa ja tarvittaessa korjata videolta jälkikäteen. Tämä mahdollistaa työvaiheiden ajanmenekkien määrittämisen myöhemmässä ajankohdassa toimistolla.

Ohjelma toimi siten, että hakkuun aikana kuvattu videoaineisto avattiin ohjelmassa, jonka jälkeen määritettiin joko ennalta päätetyt työvaiheet tai asetettiin työvaihe sen jälkeen kun se oli esiintynyt videolla ensimmäisen kerran. Ajanmenekit tallennettiin käynnistämällä toisto ja katsomalla yksi työvaihe loppuun, minkä jälkeen video pysäytettiin ja valittiin katsottua otosta vastaava työvaihe luettelosta. Lopuksi työvaihe tallennettiin, jolloin ohjelma näytti heti mm. työvaiheen aloitus- ja lopetusajan sekä keston sekunteina. Tätä jatkettiin, kunnes kaikki työvaiheet oli tallennettu. Tallennusta voitiin nopeuttaa ohjelmistosta löytyvällä Non Stop Timing-työkalulla. Tällöin toistoa ei tarvinnut pysäyttää aina työvaiheen päätyttyä, vaan työvaiheen ajanmenekki voitiin tallentaa tuplaklikkaamalla kyseistä työvaihetta luettelosta. Työvaiheisiin voitiin lisätä tallennuksen aikana mm. tekstimuotoisia muistiinpanoja tai esimerkiksi taakassa olleiden runkojen lukumäärä. Mikäli työvaihe päätettiin virheellisesti liian aikaisin, löytyi ohjelmasta työkalu, jolla seuraava työvaihe voitiin lisätä edelliseen tallennettuun työvaiheeseen. Tämän seurauksena työvaihe esiintyi tuloluettelossa kahtena erillisenä havaintona, mutta laskennassa nämä havainnot käsiteltiin yhtenä havaintona. Työvaiheiden tallennuksen jälkeen kaikki yksittäiset havainnot voitiin tarkistaa valitsemalla haluttu työvaihe tuloluettelosta, jolloin ohjelma toisti vain sen työvaiheen. Jos havainto todettiin virheelliseksi, sen aloitus- ja lopetusajankohtaa voitiin muuttaa ilman, että edellisen tai seuraavan työvaiheen ajanmenekki vääristyi.

Ohjelmiston käyttö työvaiheiden ajanmäärittämisessä toi muutamia hyötyjä verrattuna perinteiseen hakkuun aikana tehtävään kellotukseen nähden. Tärkein näistä oli tulosten tarkistettavuus ja yksinkertaiset järjestelyt hakkuun aikana. Ohjelman käytön eduksi voidaan lukea myös ohjelmiston helppokäyttöisyys ja yhteensopivuus Microsoft Excel -ohjelmiston kanssa. Ongelmat työvaiheiden tallennuksessa, johtuivat käytetyn tietokoneen heikosta suorituskyvystä.

6 Johtopäätökset

Uuden FX15a-paalainyksikön myötä kokopuun paalauksen tuottavuutta on saatu nostettua merkittävästi edelliseen Fixteri II -paalainyksikköön verrattuna. Nyt määritellyllä tuottavuustasolla kokopuun paalaaminen näyttää kilpailukykyiseltä vaihtoehdolta pieniläpimittaisen energiapuun korjuussa. Menetelmä on kilpailukykyisimmillään nuorissa ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman tilavuus on pieni. Erityisesti ennakkoraivattavilla kohteilla voi kokopuun paalaus osoittautua rangan hakkuuta merkittävästi edullisemmaksi menetelmäksi, tarkasteltaessa koko metsähakkeen tuotantoketjua. Lisäksi energiatuen saaminen parantaa menetelmän kilpailukykyä entisestään. Erityiskohteissa kuten puistohakkuissa ja asutuksen lähellä kokopuun paalaus on varteenotettava vaihtoehto siistin korjuujäljen ansiosta.

Kokopuuta paalatessa kuljettaja joutuu harvakseltaan odottelemaan paalaimen toimintojen valmistumista. Tämä vaatii kuljettajan huomion täysimääräisesti, eikä kuljettaja näin ollen voi suorittaa hakkuutyötä täysin keskeytyksettä. Kokopuun paalauksen tehoajasta yhteensä 8,5 % kului paalaimen odottamiseen ja syötön avustamiseen. Näihin kuluva aika tulisi tuotekehityksellä saada minimoitua. Yksi mahdollisuus tämän ongelman ratkaisemiseksi voisi olla paalainyksikön nopeampi mittaanajo ja paalainyksikön käynnön automatisointi. Ellei kesken oleva syöttö estä paalaimen kääntymistä, voisi koneyksikön tietojärjestelmä tunnistaa kummalla puolella työskentelyaluetta kuljettaja keräilee puita ja kääntää automaattisesti paalainyksikön syöttöaukon jo valmiiksi sille puolelle.

Paalainyksikön syöttöaukon ollessa paalaimen edessä kuljettaja joutuu tuomaan keräämänsä kourataakan koneen etusektorille kaadettavaksi, jolloin jäävälle puustolle aiheutuvien korjuuvaurioiden riski kasvaa. Paalaimen kääntösädetä kasvattamalla puunippu voitaisiin syöttää paalaimen syöttöyksikköön lähempää puiden kantoleikkausta. Toisaalta tällöin keskeneräinen syöttö rajoittaa koneen

siirtoa. Työskentelytavan optimointi sekä nopeampi mittaanajo ja katkenta voisi osittain ratkaista tämän ongelman.

Erikoisvalmisteisen kahmarin käyttöä metsäkuljetuksessa voisi harkita, mikäli kahmarin valmistamisen ja pikakiinnitysmekanismin kustannukset eivät olisi korkeat. Paalien lyhydestä johtuva pieni taakkakoko nostaa erityisesti kuorman purun ajanmenekkiä. Vakiorakenteista kahmaria suuremmalla piikkikahmarilla taakkakoko voitaisiin tuplata, ottamalla kourataakkaan yhden paalin sijasta kaksi paalia. Normaaliin huulilevylliseen kahmariin verrattuna piikkikahmari ei oletettavasti rasittaisi paalin sidontaa yhtä voimakkaasti. Nostamalla taakkakoko kuormauksen ja kuorman purun ajanmenekkejä voitaisiin vähentää ja tätä kautta tuottavuutta nostaa.

Uuraisilla esiintyneet ongelmat paalien sidonnassa on ratkaistava, sillä metsäkuljetuksen yhteydessä hajoavat paalit laskevat metsä- ja kaukokuljetuksen tuottavuutta merkittävästi, mikä jo yksistään voi aiheuttaa koko tuotantoketjun yksikkökustannusten nousun kannattamattomalle tasolle. Menetelmän kilpailukyvyyn kannalta on muistettava, ettei tuleva tuotekehitys saa nostaa merkittävästi paalainyksikön hankintakustannuksia nykyisestä.

Vaikka kokopuun paalaus näyttäisi tämän tutkimuksen perusteella olevan kilpailukykyinen vaihtoehto pieniläpimittaisen energiapuun korjuussa, tulisi menetelmää tutkia perusteellisemmin useammilla koneyksiköillä ja kuljettajilla vaihtelevissa korjuuolosuhteissa, niin kesä- kuin talviaikaankin. Lisäksi FX15a-konemallia tulisi tarkastella pitkän aikavälin seuranta-aineiston avulla. Myös kokopuupaalien kaukokuljetuksen tehostamista ja paalien ominaisuuksia metsähakkeen raaka-aineena tulisi tutkia lisää.

Lähteet

Ala-Kangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf> [Viitattu 29.10.2013]

Ala-Kangas, E. 2013. Kiinteiden biopolttoaineiden kansainväliset standardit – metsähake esimerkkinä. VTT. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2006/kiinteiden_biopolttoaineiden_standardisointi.pdf [Viitattu 29.10.2013]

Anttila, P. & Laitila, J. 2013. Markkinahakkuiden nykytasolla metsähakkeen käytön suurin kasvumahdollisuus on harvennuspuussa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedote 29.5.2013. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/2013/2013-05-29-metsahake.htm> [Viitattu: 7.6.2013]

Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J. & Korhonen, K. 2013. Metsähakkeen alueellinen korjuupotentiaali ja käyttö. Metlan työraportteja 267. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp267.pdf> [Viitattu 3.7.2013.]

Asplund, D., Flyktman, M. & Uusi-Penttilä, P. 2009. Arvio mahdollisuuksista saavuttaa uusiutuvien energialähteiden käytön tavoitteet vuonna 2020 Suomessa. Finbion julkaisuja 42.

Biojalostamon rakentaminen etenee Iisalmessa. 2013. Maaseudun tulevaisuus. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/biojalostamon-rakentaminen-etenee-iisalmessa-1.35771> [Viitattu 23.7.2013]

Erkkilä, A., Hillebrand, K., Raitila, J., Virkkunen, M., Heikkinen, A., Tiihonen, I., & Kaipainen, H. 2011. Kokopuun ja mäntykantojen korjuuketjujen sekä varastoinnin kehittäminen. Tutkimusraportti. Valtion teknologian tutkimuskeskus. 55 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VTT-R-10151-10.pdf> [Viitattu 26.6.2013]

Hakkila, P. 1991. Hakuuipoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. Metsäntutkimuslaitos. 24 s.

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma1999–2003. Loppuraportti. Tekes, Teknologiaohjelmaraportti 5/2004.

Hakkila, P. 2005. Fuel from early thinning. International journal of forest engineering 16. s.11–14. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://journals.hil.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/9836/9964> [Viitattu 8.7.2013]

Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp010.pdf> [Viitattu 15.7.2013]

Härmälä, E. 2013. Metsähakkeen kilpailukyvyistä huolehditaan. Työ- ja elinkeinoministeriön tiedotteet 2011. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/index.phtml?105033_m=104808&s=4760 [Viitattu 3.7.2013]

Ihalainen, T. & Niskanen, A. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. Metlan työraportteja 166. 56 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.pdf> [Viitattu 18.7.2013]

Iittiläinen, P., Hyppölä, A., Kariniemi, A., Nieminen, T., Poikela, A., Ranta, R., Roininen, K., Rumpunen, H., Tolonen, H. & Äijälä, O. 2003. Korjuujälki harvennushakkuussa -opas. Metsäteho Oy. 36 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Opas/Korjuujalki_harvennushakkuussa_opas.pdf [Viitattu 16.7.2013]

Jacobson, S. & Kukkola, M. 1999. Skogbränsleuttag i gallring ger kända tillväxtförhållanden. Skogforsk resultat 13/1999. 4 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.skogforsk.se/upload/Dokument/Resultat/1999-13.pdf> [Viitattu 8.7.2013]

Janka, P. 2013. Uusien energiainvestointien avustus- ja tukipolitiikka. Työ- ja elinkeinoministeriö. Uudet energiainvestoinnit Etelä-Savossa. 24 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://biosaimaa.fi/wp-content/uploads/2013/05/Uusien_energiainvestointien_avustus-_ja_tukipolitiikka_Janka_TEM.pdf [Viitattu 2.7.2013]

Jylhä, P. 2007. Harvesting undelimited Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from first thinning for integrated production of kraft pulp and energy. *Dissertationes Forestales* 133. 714 s.

Jylhä, P. & Laitila, J. 2007. Energy wood and pulpwood harvesting from young stands using a prototype whole-tree bundler. *Metsäntutkimuslaitos. Silva Fennica* 41(4). 763–779 s.

Jylhä, P. 2011. Harvesting undelimited Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from first thinnings for integrated production of kraft pulp and energy. *Dissertationes Forestales* 133. 73 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/dissertationes/df133.pdf> [Viitattu 4.7.2013]

Jönsson, M. 2007. Parkavfall som biobränsle genom förbränning – analys av ”Lundamodellen” samt en fallstudie av två skånska kommuners potential för användning av ”Lundamodellen” [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://ex-epsilon.slu.se:8080/archive/00001956/01/Biobr%c3%a4nsle.pdf> [Viitattu 9.10.2013]

Kansallinen energia- ja ilmastostrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 20. päivänä maaliskuuta 2013. VNS 2/2013 vp. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja ilmasto. 8/2013. 53 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/36266/Energia_ja_ilmastostrategia_nettiljulkaisu_SUOMEN_KIELINEN.pdf [Viitattu 3.7.2013]

Kansallinen energia- ja ilmastostrategia, taustaraportti. 2013. Työ- ja elinkeinoministeriö. 179 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf [Viitattu 10.6.2013]

Kansallinen metsäohjelma 2015. 2010. Metsästä biotalouden vastuullinen edelläkävijä. Valtioneuvoston periaatepäätös 16.12.2010. Maa- ja metsätalousministeriö. 52 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/metsat/kmo/5ywLDJ2Uy/Kansallinen_metsaohjelma_2015_Valtioneuvoston_periaatepaatos_16.12.2010.pdf [Viitattu 23.7.2013]

Kemera-opas. 2007. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja metsäkeskus Pirkanmaa. 50 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Kemerakuvat/Kemera_opas_010907.pdf [Viitattu 3.7.2013]

Kilpailukykyä parannetaan raskaan liikenteen uusilla mitoilla ja massoilla. 2013. Liikenne- ja viestintäministeriön tiedote 06.06.2013. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.lvm.fi/tiedote/4150293/kilpailukyky-parannetaan-raskaan-liikenteen-uusilla-mitoilla-ja-massoilla> [Viitattu 30.8.2013]

Kuitto, P.J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38s.

Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.) 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset. Tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Energiaseminaari%2020112007/Energiapuun_korjuun_ymparistovaikutukset.pdf [Viitattu 8.7.2013]

Kärhä, K., Keskinen, S., Kallio, T., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006a. Ennakkoraivaus osana harvennuspuiden korjuuta. Metsätehon raportti 187. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_187.pdf [Viitattu 16.8.2013]

Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006b. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. Metsätehon raportti 193. 85 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_193.pdf [Viitattu 4.7.2013]

Kärhä, K., Keskinen, S., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Aines- ja energiapuun hankintaketjujen kannattavuusvertailu. Metsätehon tulosalvosarja 2007/2. 52 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2007_02.pdf [Viitattu 5.7.2013]

Kärhä, K. 2009. Suomen metsäenergiapotentialit. Metsätehon iltapäiväseminaari: Logistiikan näkymät ja bioenergian mahdollisuudet. Metsäteho Oy 43 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Seminaari/Seminaari_2009_01_f_Kalle_Karha_Suomen_metsaenergiapotentiali.pdf [Viitattu: 23.7.2013]

Kärhä, K., Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y., & Keskinen, S. 2009. Kokopuun paalaus -tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 211. 68 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_211_Kokopuun_paalaus_tuotantoketjun_tuottavuus_ja_kustannukset_kk.pdf [Viitattu 30.7.2013]

Kärhä, K., Strandström, M., Lahtinen, P. & Elo, J. 2009. Metsähakkeen tuotannon kalusto- ja työvoimatarve Suomessa 2020. Metsätehon katsaus 41. 4 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus_041_Metsahakkeen_tuotannon_kalusto-ja_tyovoima_kk.pdf [Viitattu 4.7.2013]

Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T., Keskinen, S., Saijonmaa, P., Heiskanen, H., Strandström, M. & Pajuoja, H. 2010. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ ja elinkeinoministeriön julkaisuja. Energia ja Ilmasto 66/2010. 68 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/28437/TEM_66_2010_verkkojulkaisu.pdf [Viitattu 10.6.2013]

Kärhä, K., Kumpare, T., Keskinen, S. & Petty, A. 2011a. Ponsse Ergo/H7 rankapuun hakkuussa ensiharvennuksella. Metsätehon tulosalvosarja 1/2011. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2011_01_PonsseErgoH7_kk_ym.pdf [Viitattu 20.8.2013]

Kärhä, K., Mutikainen, A., Keskinen, S. & Petty, A. 2011b. Valmet 901.4/350.1 rankapuun hakkuussa ensiharvennuksella. Metsätehon tulosalvosarja 11/2011. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2011_11_Valmet_901_350_kk.pdf [Viitattu 20.8.2013]

Kärhä, K., Perho, A., Kumpare, T., Keskinen, S., Sorsa, J-A., Poikela, A. & Palander, T. 2012. Utilization of multi-tree handling in cutting of thinning wood. *Mežzinātne* 25. Special issue abstracts for international conferences organised by LSFRI Silava in cooperation with SNS and IUFRO. 74–75 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: [http://www.silava.lv/userfiles/file/Mezzinatne%2025\(58\)2012/Mezzinatne%2025%20Oscar\(1\).pdf](http://www.silava.lv/userfiles/file/Mezzinatne%2025(58)2012/Mezzinatne%2025%20Oscar(1).pdf) [Viitattu 17.9.2013]

Laasasenaho, J. 1982. Männyn, kuusen ja koivun runko-käyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Metsätieteellisen koelaitoksen julkaisuja* 108. 74 s.

Laitila, J. 2008. Metsäenergia nyt ja tulevaisuudessa. *Päättäjien* 24. metsäakatemia. 5 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: [http://www.smy.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/allbyid-PMA/328BC41F2DEE2F8DC225745700281CBF/\\$file/PMA24-JuhaLaitila.pdf](http://www.smy.fi/smy/Materiaalitdeve.nsf/allbyid-PMA/328BC41F2DEE2F8DC225745700281CBF/$file/PMA24-JuhaLaitila.pdf) [Viitattu 2.7.2013]

Laitila, J., Asikainen, A. & Anttila, P. 2008. Energiapuuvarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. & Iivesniemi, H. (toim.). *Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset - tutkimusraportti*. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio ja Metsäntutkimuslaitos. s. 6–12.

Laitila, J., Kärhä, K. & Jylhä, P. 2009. Time consumption models and parameters for off- and on-road transportation of whole-tree bundles. *Baltic Forestry* 15. 105–113 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: [http://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2009-15\[1\]/BF09%2015\(1\)%20p%20105_114.pdf](http://www.balticforestry.mi.lt/bf/PDF_Articles/2009-15[1]/BF09%2015(1)%20p%20105_114.pdf) [Viitattu 5.7.2013]

Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketuottavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011. 107–126 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff11/ff112107.pdf> [Viitattu 19.7.2013]

Leino, P., Lahtinen, P., Elo, J. & Ranta, T. 2007. Puupolttoaineiden kysyntä ja tarjonta Suomessa vuonna 2020. -Päivitetty tilannekatsaus. Pöyry Oy. Selvitys 60K300 14.02-Q210-001A.

Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2013. Puutavaran mittaus. Metsätalouden kehittämiskeskus ja Tapio. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/isbn/978-952-5694-28-4/energiapuun-mittausopas-2013.pdf> [Viitattu 30.8.2013]

Maa- ja metsätalousministeriön asetus kuormainvaan käytöstä puutavaran mittauksessa ja erien erillään pidosta annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen muuttamisesta. 2010. Maa- ja metsätalousministeriön asetus Nro. 8/10. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/mittaus_maastossa/Kuormainvaaka_MMM_asetus_Liite_2_ ja_3.pdf [Viitattu 21.8.2013]

Maidell, M., Pyykkönen, P. & Toivonen R. 2008. Metsäenergiapotentialit Suomen maakunnissa. Summary: Regional potentials for forest-based energy in Finland. Pellervon taloudellisen tutkimuslaitoksen työpapereita 106.

Metsän kasvatukseen ja uudistamiseen liittyvää sanastoa. 2013. Maa- ja metsätalousministeriö. 5 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.mmm.fi/attachments/metsat/newfolder/5preu8m47/Uusi_sanasto.pdf [Viitattu 13.6.2013]

Metsätilastollinen vuosikirja 2012. 2012. Metsäntutkimuslaitos. 454 s.

Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and Time Consumption of Timber Trucking in Finland. *Silva Fennica* 41. 17 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.eu/silvafennica/full/sf41/sf413471.pdf> [Viitattu 28.8.2013]

Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40. 335–363 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.eu/silvafennica/full/sf40/sf402335.pdf> [Viitattu 17.9.2013]

Nuutinen, Y. 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in the studies on harvester operations. *Dissertationes Forestales* 156. 68 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/dissertationes/df156.pdf> [Viitattu 21.8.2013]

Nuutinen, Y. & Björheden, R. 2013. Fixteri-kokopuupaalaimen tuottavuudessa merkittävä parannus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedote 22.4.2013. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/2013/2013-04-22-kokopuupaalain.htm> [Viitattu 18.7.2013]

- Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallingsförsök i tallskog. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 29. 169 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://pub.epsilon.slu.se/10159/1/medd_statens_skogsforskningsanst_029_01.pdf [Viitattu 21.8.2013]
- Ohlström, M. 2008. Uusiutuva energia teollisuudessa. TEM:n asiantuntijaseminaari uusiutuvasta energiasta. Elinkeinoelämän keskusliitto. 15 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/18620/TEM_RES_teollisuudessa_Ohlstrom.pdf [Viitattu: 10.6.2013]
- Poikela, A. 1996. Latvusmassan pituussuuntainen jakauma. Metsätehon raportti 10. 28 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_010.pdf [Viitattu 21.8.2013]
- Pienpuun energiatukijärjestelmä edelleen komission käsittelyssä – energiapuun korjuuta tuetaan v. 2014 loppuun asti kemeran korjuutuella. 2013. Maa- ja metsätalousministeriö. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/metsat/hankkeet_tyoryhmat/lainsaadantohankkeet_0/pienpuunenergiatuki.html [Viitattu 3.7.2013]
- Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. 2008. 130 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.tem.fi/files/20585/Selontekoehdotus_311008.pdf [Viitattu: 7.6.2013]
- Puupolttoaineiden kysyntä, tarjonta ja toimitusvarmuus päästökauppatilanteessa. 2005. Electrowatt-Ekono Oy. Selvitys 60k04773.01-Q060-031A.
- Rajamäki, J., Kariniemi, A. & Oijala, T. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus. Metsätehon raportti 8. 20 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Raportti/Raportti_008.pdf [Viitattu 17.9.2013]
- Ranta, T., Lahtinen, P. & Laitila, J. 2007. The effect of CO2 emission trade on the wood fuel market in Finland. Biomass and Bioenergy 31(8): 535–542.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 2012. Biometria. Tilastotiedettä ekologeille. 569 s.

Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Työtehoseuran julkaisu 381. 67 s.

Räisänen, T. 2012. Karsitun energiapuun kertymä nuorten metsien harvennushakkuussa. Metsäntutkimuslaitos. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.forestpower.net/data/liitteet/17288=1026_karsitun_epuun_kertyma_nuorista_metsista.pdf [Viitattu 15.8.2013]

Strandström, M. 2013. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2012. Metsätehon katsaus 49. 4 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus_049_Puunkorjuu_ja_kaukokuljetus_vuonna_2012_ms.pdf [Viitattu 2.9.2013]

Suomen säädöskokoelma. 101/2011. Laki pienpuun energiatuesta. 2011. Oikeusministeriö. [Verkkodokumentti] Saatavissa: www.finlex.fi/fi/laki/kokoelma/2011/sk20110101.pdf [Viitattu 3.7.2013]

UPM rakentaa maailman ensimmäisen puupohjaista biodieseliä valmistavan biojalostamon. 2012. UPM Oy. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.upm.com/FI/MEDIA/Uutiset/Pages/UPM-rakentaa-maailman-ensimm%C3%A4isen-puupohjaista-biodieseli%C3%A4-valmistavan-biojalost-001-Wed-01-Feb-2012-10-05.aspx> [Viitattu 15.11.2013]

Ylitalo, E. 2013. Puun energiakäyttö 2012. Metsätilastotiedote 15/2013. Metsätilastollinen tietopalvelu. Metsäntutkimuslaitos. 7 s. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/mtt/2013/puupolttoaine2012.pdf> [Viitattu: 7.6.2013]

LIITE 1

| Kaukokuljetuksen ajanmenekki tyhjänä- ja kuormattunajolle* | | |
|--|--|-------------------------------|
| | S = | 100 km |
| | V = | 44,2 m ³ |
| Tyhjänäajo, m ₁ | $m_1 = 3,820 * S_1^{0,688}$ $m_1 = S_1 / 1,250$ | s < 150 km s > 150 km |
| | m ₁ = | 90,80 min/load ⁻¹ |
| Kuormattuna-ajo, m ₂ | $m_2 = 2,561 * S_2^{0,785}$ $m_2 = S_2 / 1,250$ | s < 224 km s > 224 km |
| | m ₂ = | 95,15 min/load ⁻¹ |
| Muu ajo, m ₃ | | 12,78 min/load ⁻¹ |
| Viivästykset, m ₄ | | 7,83 min/load ⁻¹ |
| Ajoaikojen summa | | 206,56 min/load ⁻¹ |

* Nurminen & Heinonen 2007

LIITE 2

| Työvaihe | Paalit | | | | | Karsittu ranka | | Ajanmenekki |
|---|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| | Puutavara-auto (90 paalia)* | Energiapuuauto (90 paalia) | Energiapuuauto (155,4) paalia | Puutavara- auto(76 t, 114,48 paalia) | Energiapuuauto (76 t, 114,5 paalia) | Puutavara-auto (Ranka 38 m³)* | Puutavara-auto (Ranka 42,2 m³) | |
| Kuormainen valmistelut | 2,23 | 2,23 | 2,23 | 2,23 | 2,23 | 1,38 | 1,38 | min |
| Pankkojen käsittely | 1,87 | 0 | 0,00 | 1,87 | 0,00 | 1,40 | 1,40 | min |
| Kuormaus | 24,40 | 24,40 | 42,13 | 31,04 | 31,04 | 16,15 | 17,93 | min |
| Kuorman järjestely | 1,50 | 1,50 | 2,59 | 1,91 | 1,91 | 3,20 | 3,55 | min |
| Siirrot varastolla ja purkupaikalla | 3,27 | 3,27 | 5,64 | 3,27 | 3,27 | 0,00 | 0,00 | min |
| Kuorman sitominen ja avaus | 10,43 | 0,00 | 0,00 | 10,43 | 0,00 | 9,88 | 9,88 | min |
| Purkaminen | 18,75 | 18,75 | 32,38 | 23,85 | 23,85 | 13,38 | 14,86 | min |
| Siivous | 3,97 | 3,97 | 3,97 | 3,97 | 3,97 | 0,00 | 0,00 | min |
| Yhteensä | 66,42 | 54,12 | 88,94 | 78,56 | 66,26 | 45,40 | 49,00 | min |
| Ajoaikojen summa | 206,56 | 206,56 | 206,56 | 206,56 | 206,56 | 206,56 | 206,56 | min/kuorma |
| | 3,44 | 3,44 | 3,44 | 3,44 | 3,44 | 3,44 | 3,44 | h/kuorma |
| Terminaalitoimintojen ajanmenekki | 66,42 | 54,12 | 88,94 | 78,56 | 66,26 | 45,40 | 49,00 | min/kuorma |
| | 1,11 | 0,90 | 1,48 | 1,31 | 1,10 | 0,76 | 0,82 | h/kuorma |
| Kokonaisajankäyttö, m m=m ₁ +m ₂ +m ₃ +m ₄ +m ₅ | m= 272,97 | 260,67 | 295,49 | 285,12 | 272,82 | 251,96 | 255,56 | min/kuorma |
| Tuottavuus | 7,72 | 8,08 | 9,02 | 7,46 | 7,79 | 9,05 | 9,90 | m³/h |
| Kustannukset | | | | | | | | |
| Ajon kustannus, €/h ** | 86,4 | 89,0 | 89,0 | 86,4 | 89,0 | 86,4 | 86,4 | €/h |
| Terminaalitoimintojen kustannus, €/h ** | 60,7 | 63,2 | 63,2 | 60,7 | 63,2 | 60,7 | 60,7 | €/h |
| Kokonaiskustannus, € | 364,63 | 363,39 | 400,07 | 376,92 | 376,19 | 343,37 | 347,02 | €/h |
| Tuntikustannus, €/h | 80,15 | 83,64 | 81,23 | 79,32 | 82,73 | 81,77 | 81,47 | €/h |
| Yksikkökustannus, €/m³ | 10,39 | 10,35 | 9,01 | 10,64 | 10,62 | 9,04 | 8,23 | €/m³ |

* Kärhä ym. 2009

** Laitila & Väättäinen 2011