Metsätehon raportti 211
18.12.2009

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

Metsäteho

Kokopuun paalaus -tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset

Kalle Kärhä
Juha Laitila
Paula Jylhä
Yrjö Nuutinen
Sirkka Keskinen

METSÄTEHO OY
PL 101 (Snellmaninkatu 13)
00171 Helsinki
Puh. 020 765 8800
Faksi (09) 659 202
www.metsateho.fi

Kokopuun paalaus -tuotantoketjun tuottavuus ja kustannukset

Kalle Kärhä
Juha Laitila
Paula Jylhä
Yrjö Nuutinen
Sirkka Keskinen

Metsätehon raportti 211
18.12.2009

ISSN 1459-773X (Painettu)
ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

Asiasanat: ainespuu, energiapuu, puunkorjuu, integrointi, paalaaminen, nuoret metsät

© Metsäteho Oy

Helsinki 2009

SISÄLLYS

ALKUSANAT **5**

TIIVISTELMÄ **6**

1 JOHDANTO **8**
1.1 Hankkeen tausta 8
1.2 Tavoitteet 11

2 AINEISTO JA MENETELMÄT **11**
2.1 Kokopuupaalien ominaisuudet 11
2.2 Kokopuun paalaus 13
2.3 Kokopuupaalien metsäkuljetus 17
2.4 Kokopuupaalien kaukokuljetus 19
2.5 Tuotantoketjujen vertailulaskelmat 21

3 TULOKSET **24**
3.1 Kokopuupaalien ominaisuudet 24
3.2 Kokopuun paalaus 28
3.3 Kokopuupaalien metsäkuljetus 37
3.4 Kokopuupaalien kaukokuljetus 45
3.5 Tuotantoketjujen vertailulaskelmat 47

4 TARKASTELU **52**

5 JOHTOPÄÄTÖKSET **56**

LÄHDELUETTELO **57**

LIITTEET 1–6

ALKUSANAT

Tämä julkaisu on *Aines- ja energiapuun korjuun integrointi paalausmenetelmällä* -T&K-konsortion pääraportti. Muut konsortiossa tuotetut julkaisut on listattu liitteeseen 1. Konsortio koostui kahdesta rinnakkaishankkeesta (osahanke 1: Kokopuun paalauksen tehostaminen ja osahanke 2: Kokopuun paalaus -tuotantoketjun kustannustehokkuus) sekä hankkeen koordinointiosasta.

T&K-konsortio toteutettiin 1.2.2007–31.12.2009 ja sen rahoittivat Tekes, Metsäteho Oy ja sen osakkaat. Metsätehon osakkaista UPM Metsä rahoitti myös suoraan osahanketta 1.

Osahankkeen 1 omistaja oli Biotukki Oy (nykyisin Fixteri Oy). Osahankkeen 2 omistaja oli Metsäteho Oy. Lisäksi Metsäteho hoiti T&K-konsortion koordinoinnin ja hallinnoinnin. Konsortion vastuullinen johtaja oli toimitusjohtaja Heikki Pajuoja Metsätehosta. Konsortion koordinoinnin hoiti ja osahankkeen 2 projektipäällikkö oli erikoistutkija, dosentti Kalle Kärhä Metsätehosta. Tutkimuspalvelut osahankkeeseen 2 ostettiin valtaosin Metsäntutkimuslaitokselta.

Konsortion ohjausryhmän puheenjohtaja oli kehittämispäällikkö Risto Lilleberg Osuuskunta Metsäliitosta ja sen jäsenet olivat kehittämispäällikkö Christer Backlund UPM Metsästä, kehittämispäällikkö Tore Högnäs Metsähallituksesta, bioenergiapäällikkö Jorma Kaukoaho ja bioenergiaesimies Teemu Manninen Stora Enso Metsästä, teknologia-asiantuntijat Mauri Marjaniemi ja Jarkko Tenhunen Tekesistä, varttunut tutkija Juha Laitila ja tutkija Paula Jylhä Metsäntutkimuslaitokselta, toimitusjohtaja Pasi Romo Fixteri Oy:stä sekä Heikki Pajuoja ja Kalle Kärhä (siht.) Metsätehosta.

Esitän suuret kiitokset kaikille hankkeen tekoon osallistuneille henkilöille, yrityksille ja organisaatioille.

Helsingissä joulukuussa 2009

toimitusjohtaja Heikki Pajuoja
Metsäteho Oy

TIIVISTELMÄ

Tutkimushankkeessa selvitettiin Fixteri II -kokopuupaalaimeen perustuvan aines- ja energiapuun hankinnan kilpailukykyä. Hankkeen tavoitteet olivat

1) selvittää kokopuupaalien ominaisuudet ja niiden yhteys puustotunnuksiin,
2) rakentaa tuottavuusperusteet kokopuun paalaukseen sekä kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetukseen ja
3) määrittää hankintakustannukset kokopuun paalaus -tuotantoketjussa ja verrata kustannuksia muiden aines- ja energiapuun hankintaketjujen kustannuksiin sekä selvittää optimaalinen käyttöalue kokopuun paalaus -tuotantoketjulle.

Tutkimuksessa mitattujen kokopuupaalien keskiläpimitta oli 65 cm ja keskipituus 268 cm. Paalauksen aikatutkimuskoealoilta korjattujen kokopuupaalien tuoremassa oli keskimäärin 476 kg. Paalien kiintotilavuus oli keskimäärin 495 dm^3, josta oksien osuus oli keskimäärin 17 %. Poistuman keskijäreyden kasvaessa kokopuupaalien koko kasvoi.

Tutkimuksessa Fixteri II -kokopuupaalaimen tehotuntituottavuus oli huomattavasti korkeampi kuin ensimmäisen prototyyppipaalaimen (Fixteri I). Poistuman keskikoon kasvu 20 dm^3:stä 75 dm^3:iin lähes kaksinkertaisti kokopuun paalauksen tehotuntituottavuuden Fixteri II -paalaimella: kun poistuma oli 20 dm^3, kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus oli 3,4 m^3/h ja 75 dm^3:n kokopuulla 6,1 m^3/h.

Kokopuun paalauksen tuottavuuden huomattavaa paranemista voidaan selittää sillä, että uudella Fixteri-hakkuulaitteella pystyttiin syöttämään puut hakkuun ja taakan keruun jälkeen suoraan paalaimeen ilman erillistä välikasausta ja kuormausta. Lisäksi paalaimen kuljettaja hyödynsi hakkuutyössä tehokkaasti joukkokäsittelyä: joukkokäsittelyprosentti oli keskimäärin 80 % ja keskimääräinen taakkakoko oli 2,9 puuta/taakka. Työvaiheita pystyttiin myös lomittamaan hyvin toisiinsa.

Kokopuiden paalaus suurensi taakkakokoa kuormaus- ja purkutyössä sekä kasvatti kuormakokoa metsäkuljetuksessa. Aikatutkimuksessa kuormakoko oli keskimäärin 22 kokopuupaalia. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus oli 23,8 m^3 tehotunnissa, kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia (paalin koko 0,5 m^3), hakkuukertymä 60 m^3/ha ja metsäkuljetusmatka 300 m.

Kuormakoon kasvattaminen 22 kokopuupaalista 29 kokopuupaaliin lisäsi metsäkuljetuksen tuottavuutta 2,8 m^3 tehotunnissa, kun metsäkuljetusmatka oli 300 m. Vastaavasti kuormakoon pieneneminen 22 kokopuupaalista 15 kokopuupaaliin laski tuottavuutta 4,0 m^3 tehotunnissa. Kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia, kokopuupaalin koon pieneneminen 0,5 m^3:stä 0,4 kiintokuutiometriin laski metsäkuljetuksen tuottavuutta 300 metrin metsäkuljetusmatkalla 4,8 m^3 tehotunnissa. Vastaavasti paalin kiintotilavuuden kasvu 0,5:stä 0,6 kiintokuutiometriin paransi metsäkuljetuksen tuottavuutta 4,8 m^3 tehotunnissa.

Kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormausta ja purkua hidasti pieni taakkakoko (paalit olivat lyhyitä) pitkään (5 m) kuitupuuhun verrattuna, vaikka kuormakoko olikin likimain sama. Pitkällä kuitupuulla vetoautoon mahtui yksi puunippu ja perävanuun kaksi nippua. Kokopuupaaleilla vetoautoon oli kuormattava kaksi paalinippua ja perävaunuun kolme, jotta saavutettiin likimain sama kuormakoko kuin pitkällä kuitupuulla. Viiden paalinipun sitomiseen ja kuormaliinojen avaamiseen meni puolestaan enemmän aikaa kuin kolmen kuitupuunipun sitomiseen ja liinojen avaamiseen. Lisäksi kokopuupaaleilla kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen on varattava huomattavasti enemmän aikaa kuin karsitulla kuitupuulla.

Tutkimuksessa laskettiin kokopuun paalaus -tuotantoketjun kustannukset ja niitä verrattiin vaihtoehtoisten tuotantoketjujen kustannuksiin pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun hankinnassa. Matalimmat kuitupuun hankintakustannukset saavutettiin aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa kahden kasan menetelmällä. Integroidussa hankinnassa myös kokopuuhakkeen kokonaiskustannukset olivat kilpailukykyiset. Energiapuupaaleista tehdyn polttohakkeen hankintakustannukset olivat korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen hankintakustannukset.

Tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus -tuotantoketju on sitä kilpailukyisempi, mitä pienirunkoisempaa korjattava ensiharvennuskuitupuu on. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että kokopuun paalauksen optimaalinen toiminta-alue on ensiharvennusleimikoissa, joissa poistuman rinnankorkeusläpimitta on 7–10 cm. Kokopuun paalauksen suhteellinen vahvuus on nimenomaan kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa. Tehdyt kustannuslaskelmat osoittivat, että kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky pelkän energiapuun hankinnassa on heikko.

Vaikka kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky näyttää suhteellisen heikolta verrattuna esimerkiksi aines- ja energiapuun integroituun hankintaan kahden kasan menetelmällä, uudet puunkäyttäjät (esim. biojalostamot) saattavat luoda uusia mahdollisuuksia kokopuun paalaukseen perustuvalle tuotantoketjulle. Tämän vuoksi on ensiarvoisen tärkeää, että pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun korjuun kehitystyöhön panostetaan monella rintamalla; yksi mielenkiintoinen kehityslinja nyt ja tulevaisuudessa on kokopuun paalaus.

1 JOHDANTO

1.1 Hankkeen tausta

Ensiharvennuksia on tehty Suomessa 2000-luvulla vuosittain keskimäärin vajaat 190 000 hehtaaria (Juntunen & Herrala-Ylinen 2008, 2009). Kymmenen vuotta sitten Kansallisessa metsäohjelmassa ensiharvennustavoite asetettiin 250 000 hehtaariksi ajalle 1999–2010 (Kansallinen metsäohjelma… 1999). 2000-luvulla ensiharvennustavoite on saavutettu vain yhtenä vuonna (2008); ensiharvennusrästejä on syntynyt vuosittain noin 70 000 hehtaaria. Valtakunnan metsien inventointilaskelmiin perustuen Korhonen ym. (2007) ovat esittäneet, että ensiharvennustavoite pitäisi olla 300 000 hehtaaria/vuosi seuraavat kymmenen vuotta Suomessa.

Ensiharvennuksissa pieni rungon koko, pieni hehtaarikohtainen ainespuukertymä ja tiheä alikasvos merkitsevät alhaista tuottavuutta ja korkeita korjuukustannuksia (esim. Kärhä ym. 2001, Oikari ym. 2008). Vuonna 2008 ensiharvennuspuun korjuukustannukset olivat keskimäärin 16,5 €/m^3 (Kariniemi 2009). Ensiharvennuspuulla hakkuun osuus korjuukustannuksista on noin 70 %. 2000-luvulla korjatuissa ensiharvennusleimikoissa ainespuukertymä on ollut keskimäärin 47 m^3/ha ja leimikon rungon keskikoko 82 dm^3. 2000-luvulla ensiharvennuspuuta on korjattu keskimäärin runsaat 8,5 milj. m^3/vuosi, mistä noin kaksi kolmasosaa on ollut mäntyä.

Mikäli ensiharvennukset olisivat tavoitetasolla (250 000 ha/v), ainespuuta olisi korjattavissa ensiharvennuksilta vuosittain runsaat 11 milj. m^3. Jos tämä taso halutaan saavuttaa, on ensiharvennuspuun korjuukustannukset pystyttävä painamaan selvästi nykyistä alemmalle tasolle. Yhtenä keinona tähän ovat uudet, innovatiiviset kone- ja menetelmäratkaisut, esimerkiksi aines- ja energiapuun korjuun integrointi paalaamalla (Kärhä 2007a, Kärhä ym. 2007a, Oikari ym. 2008).

EU:n (esim. Euroopan parlamentin… 2008a, 2008b) ilmasto- ja energiapoliittisten linjausten mukaisesti Suomessa on tavoitteena lisätä voimakkaasti uusiutuvien energialähteiden osuutta energian loppukulutuksesta. Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian Tavoiteurassa on arvioitu, että vuonna 2020 puupolttoaineiden primäärikäyttö Suomessa on 97 terawattituntia (TWh), josta metsähakkeen käyttötavoitteeksi on asetettu yhteensä 12 milj. m^3 eli noin 24 TWh (Pitkän aikavälin… 2008).

Vuonna 2008 metsähaketta käytettiin energiantuotannossa kaikkiaan 4,6 milj. m^3 (9,2 TWh) Suomessa (Ylitalo 2009). Tästä määrästä 4,0 milj. m^3 (8,0 TWh) oli energialaitosten ja 0,6 milj. m^3 (1,2 TWh) pienkiinteistöjen käyttämää metsähaketta. Energialaitosten käyttämästä metsähakkeesta valtaosa (58 %) oli päätehakkuualoilta kerättyjä hakkuutähteitä, 14 % oli kantoja ja 5 % järeää, (lahovikaista) runkopuuta. Nuorista metsistä korjattiin polttohakkeeksi karsimatonta pienpuuta 822 000 m^3 ja karsittua pienpuuta 125 000 m^3 vuonna 2008 (Ylitalo 2009).

Pääsyy nuorista metsistä korjatun pienpuuhakkeen suhteellisen vaatimattomiin tuotanto- ja käyttömääriin on sama kuin ensiharvennuspuun korjuussa: korjuukustannukset; lähes puolet pienpuuhakkeen tuotantokustannuksista muodostuu metsässä: pienpuun hakkuussa ja metsäkuljetuksessa (esim. Kärhä 2006, Laitila 2008). Jotta pienpuuhakkeen käyttö nousisi hakkuutähdehakkeen käyttömäärien tasolle, on pienpuuhakkeen tuotantokustannukset saatava huomattavasti alemmalle tasolle kuin ne nykyisin ovat.

Aines- ja energiapuun korjuun tai hankinnan integroinnilla tarkoitetaan sitä, että aines- ja energiapuun hankinta on jollakin tavoin yhdistetty toisiinsa. Integroinnilla on tarkoitus päästä pienempiin kokonaishankintakustannuksiin kuin aines- ja energiapuujakeiden erillishankinnassa (esim. Kärhä ym. 2007a). Nykyisin päätehakkuilta korjatun hakkuutähdehakkeen hankinta on vahvasti integroitu ainespuun hankintaan: hakkuutähteet puidaan kasoihin ainespuun hakkuussa ja hakkuutähteiden metsäkuljetukseen käytetään osin samaa kalustoa kuin ainespuun metsäkuljetukseen (esim. Asikainen ym. 2001, Kärhä 2007b).

Ensiharvennuksilla aines- ja energiapuun hankinnan integrointia on yritetty useaan eri otteeseen kuluneiden vuosikymmenien aikana; on kokeiltu esimerkiksi massahake- ja ketjukarsinta-rumpukuorinta-menetelmiä (esim. Hakkila & Kalaja 1993, Hakkila ym. 1998, Seppänen ym. 1998). Samanlaista menestystä ei ole kuitenkaan saavutettu aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa ensiharvennuksilla kuin päätehakkuilla; vakiintuneita, kustannustehokkaita, varsinkaan pitkille kaukokuljetusmatkoille soveltuvia toimintamalleja aines- ja energiapuun integroituun hankintaan ensiharvennuksille ei ole löydetty. Hakkuutähdehakkeen hankinnassa paalaus on osoittanut kilpailukykynsä, kun operoidaan pitkillä metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla (esim. Asikainen ym. 2001, Kärhä ym. 2004, Kärhä & Vartiamäki 2006).

Keksijä, toimitusjohtaja Pasi Romo Fixteri Oy:stä kehitti ja rakensi vuonna 2005 pieniläpimittaisen puun korjuuseen suunnitellun paalaimen ensimmäisen prototyypin (jatkossa myös *Fixteri I*). Korjuumenetelmässä leimikosta paalataan sekä ainespuumittaiset rungot että ainespuuksi kelpaamattomat energiapuurungot. Paalaus tehdään siten, että havupuurungot paalataan omiin paaleihin ja lehtipuurungot omiinsa. Paalit, joissa on sekaisin lehti- ja havupuuta, paljon alamittaisia runkoja tai ainespuuksi kelpaamattomia puulajeja, korjataan energiapuupaaleiksi.

Tuotantoketjussa kokopuupaalit kuljetetaan kuormatraktorilla tienvarsivarastolle (kuva 1). Sieltä kuitupuupaalit kuljetetaan puutavara-autolla tehtaalle, jossa ne syötetään kuorimarumpuun. Kuorimarummussa tehdään aines- ja energiapuun erottelu kuitu- ja polttojakeiksi. Kuitupuupaalauksen yhteydessä kertyneet energiapuupaalit toimitetaan energialaitokselle murskattavaksi ja poltettavaksi (kuva 1).

KUVA 1. Prosessikuvaus kokopuun paalaus -tuotantoketjusta.

Paalatun ensiharvennuspuun kuorinnasta ja massanvalmistuksesta on saatu hyviä tuloksia eri tuotantolaitoksilta (esim. Jylhä & Keskinen 2006). Metsäntutkimuslaitoksen toteuttamassa lyhyessä aikatutkimuksessa paalaustyön tuottavuus Fixteri I -paalaimella oli 6,0–7,4 paalia/tehotunti (2,6–3,7 m^3/h), kun poistuman keskikoko oli 31–40 dm^3 (Jylhä & Laitila 2007).

Metsäteho Oy:ssä ja Metsätutkimuslaitoksella selvitettiin myös laskennallisesti, mikä kokopuupaalaimen tuottavuuden olisi oltava, jotta kokopuun paalaus olisi kustannustehokas tuotantomenetelmä verrattuna kilpaileviin aines- ja energiapuun hankintaketjuihin. Tehdyt kustannuslaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus -tuotantomenetelmällä on mahdollista alittaa ”perinteisen” aines- ja energiapuun erillishankinnan nykykustannukset ensiharvennuksilla (Kärhä ym. 2007b).

Laskelmien mukaan suurin kustannussäästöpotentiaali kokopuun paalauksella olisi pieniläpimittaisissa (poistuman rinnankorkeusläpimitta 7–10 cm) ensiharvennusleimikoissa. Kun kokopuun paalaus -tuotantoketjulla korjataan vain energiapuurunkoja (poistuman rinnankorkeusläpimitta alle 7 cm), (Kärhä ym. 2007b) merkittäviä kustannussäästöjä ei saada aikaan.

Tehtyjen kannattavuustarkastelujen mukaan kokopuupaalaimen tehotuntituottavuuden on oltava yli 4,6 m^3/h (jos paalin koko 0,5 m^3, 9,2 paalia/h) korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitan ollessa 7 cm, jotta kokopuun paalaus olisi kilpailukykyinen tuotantomenetelmä (Kärhä ym. 2007b). Kun rinnankorkeusläpimitta on 11 cm, tehotuntituottavuuden on oltava yli 7,6 m^3/h (15,1 paalia/h), ja rinnankorkeusläpimitalla 13 cm yli 8,7 m^3/h (17,4 paalia/h).

Alkuvuodesta 2007 arvioitiin, että kilpailukykyiset kokopuun paalauksen tuottavuustasot ovat saavutettavissa, mikäli mm. kokopuun hakkuuta ja

syöttöä paalaimeen kyetään tehostamaan (vrt. Jylhä & Laitila 2007, Kärhä ym. 2007b). Näistä lähtökohdista Fixteri Oy käynnisti kokopuupaalaimen toisen kehitysversion (jatkossa myös *Fixteri II*) rakentamisen kevättalvella 2007.

1.2 Tavoitteet

Kokopuun paalaus -tuotantoketjun kustannustehokkuus -tutkimushankkeessa selvitettiin Fixteri II -kokopuupaalaimeen perustuvan aines- ja energiapuun hankinnan kilpailukykyä. Hankkeen tavoitteet olivat:

- selvittää kokopuupaalien ominaisuudet ja niiden yhteys puustotunnuksiin (osatehtävästä vastuussa Metsäntutkimuslaitos),
- rakentaa tuottavuusperusteet kokopuun paalaukseen sekä kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetukseen (Metsäntutkimuslaitos),
- määrittää hankintakustannukset kokopuun paalaus -tuotantoketjussa ja verrata kustannuksia muiden aines- ja energiapuun hankintaketjujen kustannuksiin sekä selvittää optimaalinen käyttöalue kokopuun paalaus -tuotantoketjulle (Metsäteho Oy).

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Kokopuupaalien ominaisuudet

Kokopuupaalien ominaisuuksia selvitettiin syys-lokakuussa 2008 ja 2009 Kangasniemellä kahdessa leimikossa (Teerikangas ja Pyyvi, liite 2). Kaikki kokopuun paalauksen aikatutkimuskoealoilta kertyneet paalit numeroitiin metsässä ja punnittiin tienvarsivarastolla yksitellen LoadMaster 2000 -kuormainvaa'alla kuormien purkamisen yhteydessä.

Upotusmittausotantaan valituilla kahdeksalla paalauksen aikatutkimuskoealalla kaikki paalit upotettiin yksitellen (liite 2, kuva 2). Upotetut paalit koostuivat yksinomaan männystä (aikatutkimuksessa lehtipuut raivattiin maahan upotusmittaukseen valituilla koealoilla). Upotusmittausaineistoon liitettiin myös kolmelta muulta koealalta syksyllä 2008 kerätty aineisto, yhteensä 15 mäntypaalia.

KUVA 2. Kokopuupaalin upotusmittaus käynnissä lokakuussa 2009.
Valokuvat: Jaakko Miettinen, Metsäntutkimuslaitos.

Upotusmittauksessa maataloustraktorin puutavarakuormaimeen kiinnitettiin kalibroitu dynamometri ja ripustusvarsi, johon upotettava taakka kiinnitettiin (kuva 2). Vaaka taarattiin ripustusvarren kanssa ennen taakan kiinnittämistä. Paalin uppoaminen varmistettiin lisäpainojen avulla. Taakan ilmassa ja vedessä saatujen punnitustulosten erotus (tarkkuus 1 kg) vähennettynä lisäpainojen ja kiinnitystarvikkeiden tilavuudella vastasi taakan kiintotilavuutta. Upotusveden lämpötila oli koko aineistossa 4–9˚C.

Oksien osuus kokopuupaaleissa selvitettiin seitsemällä aikatutkimusaineistoon kuuluneella upotusmittauskoealalla siten, että paaliaineistosta poimittiin tuoremassan perusteella tasavälein viiden paalin otos hajotettavaksi. Lisäksi kaikki syksyllä 2008 upotetut paalit hajotettiin. Hajotuspaaleista karsittiin oksat erilleen ja runkokappaleet upotettiin uudelleen. Oksien tilavuus saatiin kokonaisen paalin tilavuuden ja runkokappaleiden tilavuuden erotuksena. Kaikista avattujen paalien runkokappaleista mitattiin pituus sekä tyvi- ja latvaläpimitat.

Yhteensä tutkimuksessa punnittiin kuormainvaa'alla 454 paalia ja upotettiin 123 paalia, joista 50 hajotettiin. Pölkkyjä mitattiin yhteensä 2 728 kappaletta. Lisäksi paaleista mitattiin keskimääräinen halkaisija ja pituus.

Kokopuupaalien kosteus määritettiin syksyllä 2009 yhteensä 17 paalauksen aikatutkimuskoealalla, jotka eivät kuuluneet upotusotantaan (liite 2). Kosteusnäytteet otettiin tienvarsivarastolla välittömästi metsäkuljetuksen jälkeen. Näytteenottoon valittiin koealoittain kaksi edustavaa paalia, joiden

molemmista päistä sahattiin paalin halkaisijan puoliväliin saakka noin 20 cm:n leikot, jotka haketettiin ja hakkeesta koostettiin kosteusnäytteet. Siten kosteusnäytteiden kokonaismääräksi tuli 68 kappaletta.

Puuston runkotilavuudet laskettiin Laasasenahon (1982) tilavuusyhtälöillä. Elävien oksien ja neulasten kuivamassat laskettiin Repolan ym. (2007) malleilla, ja oksien oletettiin jakautuvan kuoreen ja puuaineeseen Kärkkäisen (1976) esittämällä tavalla. Oksakomponenttien kuivamassat muunnettiin tilavuuksiksi Gislerudin (1974) ja Kärkkäisen (1976) esittämillä kuivatuoretiheyksillä. Kuolleiden oksien oletettiin karsiutuvan hakkuun ja paalauksen aikana.

2.2 Kokopuun paalaus

Aikatutkimuksessa Fixteri II -kokopuupaalain oli Valmet 801 Combi -korjurin kuormatilan paikalla. Fixteri II -paalaimen paino oli arviolta 5,5 tonnia ja sen pituus, leveys ja korkeus olivat 4 000, 1 950 ja 2 700 mm. Koneyhdistelmän kokonaispituus oli 9 350 mm ja kokonaispaino noin 30 tonnia. Kokopuut hakattiin joukkokäsittelevällä energiapuun hakkuulaitteella ja tämän jälkeen puunippu siirrettiin paalaimen syöttöpöydälle (kuva 3), josta syöttörullat vetivät puut syöttökammioon.

KUVA 3. Joukkokäsittelevällä Fixteri-hakkuulaitteella hakattu kokopuunippu syötetään Fixteri II -kokopuupaalaimeen. Valokuva: Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos.

KUVA 4. Sidonnan jälkeen paali on valmiina pudotettavaksi puristuskammiosta ajouran varteen. Valokuva: Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos.

Paalaimessa kokopuurungot katkaistiin syöttökammion suulle asennetulla ketjusahalla 2,7 metrin pituuteen. Syöttökammiosta katkotut rungot nostettiin välikammioon. Kun paalaimen välikammiossa oli riittävästi puuta yhteen paaliin, puunippu nostettiin ylös paalaimen puristuskammioon, jossa puunippu tiivistettiin ja sidottiin paaliksi. Sidonnan jälkeen valmis paali pudotettiin paalaimesta ajouran vasemmalle laidalle odottamaan metsäkuljetusta (kuvat 4 ja 5).

Valtaosa paalaimen toiminnoista oli automatisoitu, joten hakkuuta voitiin jatkaa paalauksen aikana. Kokopuupaalin halkaisija on 60–70 cm ja kiintotilavuus noin 0,5 m^3 (vrt. Jylhä & Laitila 2007).

Konevalmistajan (Komatsu Forest AB) ilmoituksen mukaan aikatutkimuksessa olleen peruskoneen (Valmet 801 Combi, vm. 2006) moottoriteho oli 140 kW. Kuormain oli Cranab CRC 15 ja sen ulottuvuus 11 m.

KUVA 5. Kuitupuupaaleja ajouran varrella odottamassa metsäkuljetusta.
Valokuva: Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos.

Koneyksikölle suunniteltu Fixteri-hakkuulaite (kuva 6) oli myös Fixteri Oy:n valmistama ja sen paino oli arviolta 700 kg. Sykesyötöllä varustetulla hakkuulaitteella puunippu voitiin syöttää suoraan paalaimen syöttöpöydälle (ks. kuva 3). Puunipun syötön pituus oli noin yksi metri. Puiden katkaisu perustui kiinteään giljotiiniterään ja hakkuulaitteen leukojen puristusvoimaan. Puu katkesi, kun sitä puristettiin kouraa suljettaessa hakkuulaitteen terää vasten.

Fixteri II -kokopuupaalaimen aikatutkimukset suoritettiin syyskuussa 2009 Kangasniemellä. Aikatutkimus tehtiin ennakkoon mitatuilla ja maastoon merkityillä 20 * 50 metrin kokoisilla koealoilla, joita oli yhteensä 29 kappaletta kahdella eri työmaalla (Teerikangas ja Pyyvi, liite 2). Aikatutkimuksessa koealaa jatkettiin (50 m + x) tarvittaessa sen verran, että viimeinen koealalta tehty paali saatiin valmiiksi ja täysimittaisena ulos paalaimesta. Kaikki aikatutkimuskoealat olivat lähes puhdasta männikköä.

Kokopuurungot hakattiin ja paalattiin kuitupuupaaleiksi 10 koealalla ja 18 koealalla tehtiin energiapuupaaleja. Kuitupuupaaleja tehtiin upotusmittausotantaan suunnitelluilla aikatutkimuskoealoilla. Näillä lehtipuiden (yht. 18 kpl koko aineistossa) hakkuuseen kulunut aika rekisteröitiin raivaamiseksi. Lopullisessa tulosten laskennassa raivaamiseen kulunut aika jätettiin tarkastelujen ulkopuolelle. Aikatutkimuskoealalla n:o 29, jossa puusto oli muita koealoja selvästi järeämpää ja pidempää, kokeiltiin työtekniikkaa, jossa tyvet ja oksattomat välipölkyt katkottiin noin viisi metriä pitkiksi kuitupuupölkyiksi ja ainoastaan latvat paalattiin energiapuupaaleiksi.

KUVA 6. Fixteri Oy:n valmistama, joukkokäsittelevä Fixteri-hakkuulaite, jolla kokopuutaakka voidaan syöttää suoraan paalaimen syöttöpöydälle. Hakkuulaitteen katkaisumekanismi perustuu kiinteään giljotiiniterään. Valokuva: Kalle Kärhä, Metsäteho Oy.

Aikatutkimuskoealoilla poistuman keskitilavuus oli 40 dm^3 kokopuuta. Pienimmillään keskikoko oli 18 dm^3 ja suurimmillaan 77 dm^3 (liite 2). Poistuman tiheys oli aikatutkimuskoealoilla 950–3 320 r/ha. Hakkuukertymä vaihteli aikatutkimuskoealoittain välillä 50–220 kokopuupaalia/ha eli noin 28–136 m^3/ha.

Aikatutkimuksessa koneen kuljettajana toimi Fixteri-paalaimen rakentaja ja kehittäjä, jolla oli lähes neljän vuoden työkokemus kokopuun paalauksesta ja yhteensä kahdeksan vuoden työkokemus koneellisesta puunkorjuusta.

Aikatutkimuksessa käytettiin kahta työntutkijaa, joista ensimmäinen keskittyi seuraamaan hakkuun ja paalauksen työvaiheita hakkuutyön näkökulmasta. Toinen työntutkija puolestaan seurasi eri työvaiheiden samanaikaisuutta paalauksen näkökulmasta. Kokopuupaalauksen ajanmenekkimallit laadittiin työntutkijan 1 rekisteröimien työvaiheajanmenekkien mukaan. Työvaiheiden rekisteröinnissä, silloin kun eri työvaiheita tehtiin samanaikaisesti, etusijalla oli hakkuutyöhön liittyvien työvaiheiden ajanmenekin tallentaminen (työntutkija 1). Työpistesiirtymisen ajanmenekki oli prioriteettilistalla toisena ja paalauksen ajanmenekin tallentaminen kolmantena.

Työntutkija 1 jakoi kokopuun paalauksen työajan seuraaviin työvaiheisiin:

1. Työpistesiirtyminen
2. Hakkuulaitteen vienti puulle
3. Hakkuu ja puiden keruu (taakkakoko kirjattiin)
4. Taakan tuonti paalaimelle
5. Puunipun syöttäminen paalaimeen
6. Kasaus
7. Taakan kuormaus paalaimelle
8. Katkonta/sahaus
9. Paalaus
10. Paalin pudotus
11. Järjestelyt yms.
12. Raivaus
13. Keskeytys (syy kirjattiin).

Työntutkija 2 jakoi puolestaan kokopuun paalauksen työajan seuraaviin työvaiheisiin:

1. Työpistesiirtyminen
2. Taakka-aika (hakkuu ja puiden keruu)
3. Taakan tuonti paalaimelle
4. Katkonta/sahaus
5. Samanaikainen taakka- & katkonta-aika
6. Samanaikainen taakka- & paalausaika
7. Samanaikainen työpistesiirtyminen & paalaus
8. Paalaus
9. Paalin pudotus
10. Raivaus
11. Keskeytys (syy kirjattiin).

2.3 Kokopuupaalien metsäkuljetus

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuden määrittämiseksi tehtiin yhteensä 50 kokopuupaalikuorman aikatutkimus helmikuussa 2008 Kangasniemellä kahdella eri työmaalla. Aikatutkimustyömailla puut oli hakattu ja paalattu ensimmäisen sukupolven (Fixteri I) kokopuupaalaimella. Aikatutkimuspalstoilla oli sekä kuitu- että energiapuupaaleja. Aikatutkimusaineisto koostui 160 kuitupuupaalista ja 953 energiapuupaalista. Yhteensä aikatutkimuksessa metsäkuljetettiin siis 1 113 kokopuupaalia.

Aikatutkimuksessa oli 6-pyöräinen Timberjack 1010B -kuormatraktori, jossa oli Loglift 61 -kuormain (ulottuvuus: 8,5 m) ja Loglift 25 -puutavarakoura. Kuormatraktorin kuormatilan pituus oli 4 600 mm ja leveys 2 560 mm. Kuormatilaan mahtui kaksi kokopuupaalinippua peräkkäin (kuva 7). Kuormatraktorin kuljettajalla oli 2,5 vuoden työkokemus kokopuupaalien metsäkuljetuksesta ja yhteensä 4,5 vuoden kokemus puutavaran metsäkuljetuksesta.

KUVA 7. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen aikatutkimuksessa paaleja kuljetettiin Timberjack 1010B -kuormatraktorilla. Valokuva: Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos.

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehotyöaika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

1. Tyhjänäajo
2. Kuormaus (paalien lukumäärä kourassa kirjattiin)
3. Kuormausajo
4. Peruuttaminen/kääntyminen yms. palstalla
5. Kuormattuna-ajo
6. Purku (paalien lukumäärä kourassa kirjattiin)
7. Kuorman järjestely ja paalien lajittelu
8. Varastolla siirtyminen kuorman purkamisen aikana
9. Varastopaikan siistiminen.

Tyhjänäajo alkoi, kun kuormatraktori lähti liikkeelle tienvarsivarastolta ja päättyi, kun kuormatraktori pysähtyi ensimmäisen kuormattavan kokopuupaalin luo. Kuormaus alkoi, kun kuormatraktori pysähtyi työpisteelle ja aloitti kuormauksen. Kuormaus päättyi, kun viimeinen työpisteeltä kuormattava kokopuupaali nostettiin kuormaan ja kuormain siirrettiin ajoasentoon. Kuormaukseen kuuluivat kuormaimen vienti- ja tuontiliikkeet sekä mahdolliset muut kuormauksen aputoimenpiteet.

Kokopuupaalit ajettiin sekakuormina, mutta kuitu- ja energiapuupaalit pyrittiin mahdollisuuksien mukaan pitämään omissa nipuissaan kuormatilassa. Kuormausajoon kuuluivat siirtymiset työpisteiden välillä. Lisäksi aikatutkimuksessa eriteltiin kuormausajon yhteydessä tapahtuneet peruuttamiset yms. Kuormattuna-ajo alkoi kuorman tultua täyteen, kun kuormatraktori lähti liikkeelle kuormauksen päätyttyä ja loppui, kun kuormatraktori pysähtyi purkupaikalle.

Kuorman purku alkoi, kun kuormatraktori oli pysähtynyt tienvarsivarastolle ja päättyi, kun kuorma oli tyhjä ja kuormatraktori lähti liikkeelle kuorman purkupaikalta. Purkuvaiheeseen kuuluivat kuorman purku ja varastopinon järjestely. Koneen siirtymiset kuorman purkamisen aikana, kuorman järjestely ja paalien lajittelu, samoin kuin varastopaikan siistiminen kirjattiin.

Kokopuupaalien lukumäärä laskettiin kuormittain ja kuormat punnittiin Evocar 2000 -pyöräpainovaaoilla. Tyhjänä- ja kuormattuna- sekä kuormausajomatkat mitattiin lankamittarilla. Tyhjänäajomatka vaihteli tutkimuksessa välillä 20–880 m ja kuormattuna-ajossa välillä 30–770 m. Keskimääräinen tyhjänäajomatka oli 342 m ja kuormattuna-ajomatka 235 m. Kuormausajomatkaan vaikuttava kokopuupaalien ajouravarsitiheys vaihteli aikatutkimustyömailla välillä 7–45 kokopuupaalia / 100 m.

2.4 Kokopuupaalien kaukokuljetus

Tutkimuksessa selvitettiin kokopuupaalien kuormauksen ja purkamisen ajanmenekkiä autokuljetuksessa ja saatuja tuloksia verrattiin pitkän (5 m) mäntykuitupuun kuormauksen ja purkamisen ajanmenekkiin. Tutkimus tehtiin vertailevana aikatutkimuksena ja aineisto koostui neljästä puutavara-autokuormasta kokopuupaaleja ja yhdestä kuormasta pitkää mäntykuitupuuta. Autokuljetuksia tutkittiin helmi-maaliskuussa 2008 Hankasalmen ja Lievestuoreen rautatieasemien ympäristössä. Kuormaus- ja purkuolosuhteet olivat hyvät ja työ suoritettiin yhtä paalikuormaa lukuun ottamatta valoisaan aikaan vuorokaudesta.

Kokopuupaalikuormista kahdessa oli energiapuupaaleja ja kahdessa kuitupuupaaleja. Energiapuupaalit olivat pääasiassa leppää ja koivua. Kuitupuupaalit olivat mäntyä. Yhteensä tutkimuksessa oli mukana 160 kuitupuupaalia, 164 energiapuupaalia ja yksi autokuorma (38 m^3) mäntykuitupuuta. Taulukossa 1 on eritelty tarkemmin tutkimuksessa mukana olleiden kokopuupaali- ja kuitupuukuormien ominaisuudet.

TAULUKKO 1. Aikatutkimuksessa mukana olleiden autokuormien ominaisuudet.

Materiaali	Kuorman paino, kg	Kuormakoko, m^3 (kpl)	Paalin keskikoko kuormassa, m^3 (kg)
Energiapuupaali	26 300	30,2 (78)	0,39 (337)
Energiapuupaali	28 050	32,1 (86)	0,37 (326)
Kuitupuupaali	32 569	35,0 (90)	0,39 (362)
Kuitupuupaali	25 331	27,2 (70)	0,39 (362)
Mäntykuitupuu	35 650	37,9	-

KUVA 8. Aikatutkimuksessa mukana ollut Volvo FH 16 -puutavara-auto odottamassa junaa Hankasalmen rautatieasemalla. Valokuva: Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos.

Aikatutkimuksessa oli Volvo FH 16 -puutavara-auto, jossa oli Jonsered 1020 -autonosturi (ulottuvuus: 9,6 m) (kuva 8). Kolmiakseliseen vetoautoon sopi kaksi kokopuupaalinippua ja neliakseliseen perävaunuun kolme kokopuupaalinippua. Kuljetettaessa mäntykuitupuuta vetoautoon sopi yksi nippu pitkää kuitupuuta ja perävaunuun kaksi nippua pitkää kuitupuuta. Vetoautossa oli neljä pankkoa ja perävaunussa kahdeksan pankkoa. Puutavaranosturi oli kuljetuksissa mukana koko ajan.

Aikatutkimuksessa kokopuupaalit ja kuitupuu kuormattiin ja purettiin puutavara-auton omalla kuormaimella ja kuorman purku tapahtui ratapihalla suoraan junan vaunuihin. Aikatutkimuksessa kuljetettujen puiden tuoremassat ja kiintotilavuudet määritettiin UPM-Kymmene Oyj:n Pietarsaaren tehtailla. Tutkimukseen osallistuneella puutavara-auton kuljettajalla oli yhteensä 4,5 vuoden kokemus ainespuun, kantojen, irtonaisten hakkuutähteiden sekä hakkuutähde- ja kokopuupaalien autokuljetuksesta.

Aikatutkimuksessa kuorman tekoon kulunut aika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

1. Kuormaimen valmistelut aloituksessa ja lopetuksessa sekä siirtojen jälkeen
2. Pankkojen käsittely tai perävaunun jatkaminen kuormauksen aikana
3. Kuormaus (kokopuupaalien lukumäärä kourassa ja taakkojen lukumäärä kirjattiin)
4. Kuorman tai varastopinon järjestelyt kuormauksen aikana
5. Puutavara-auton siirtymiset varastolla kuormauksen aikana
6. Kuorman sitominen
7. Varastopaikan siivoaminen
8. Keskeytykset kuorman teon aikana.

Kuorman purkamiseen kulunut aika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

1. Kuormasiteiden avaus ja irrottaminen
2. Kuormaimen valmistelut aloituksessa ja lopetuksessa sekä siirtojen jälkeen
3. Purku (kokopuupaalien lukumäärä kourassa ja taakkojen lukumäärä kirjattiin)
4. Kuormaus (kokopuupaalien lukumäärä kourassa ja taakkojen lukumäärä kirjattiin)
5. Kuorman järjestelyt purkamisen aikana
6. Puutavara-auton siirtymiset purkupaikalla kuorman purkamisen aikana
7. Pankkojen käsittely tai perävaunun lyhentäminen kuormauksen aikana
8. Purkupaikan siivoaminen
9. Keskeytykset kuorman purkamisen aikana.

2.5 Tuotantoketjujen vertailulaskelmat

Tarkastellut tuotantoketjut

Tutkimuksessa verrattiin seuraavia pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun tuotantoketjuja:

- **Kuitupuun erillishankinta (Yksinpuin)**
  Tavanomainen ensiharvennuskuitupuun hankintamenetelmä eli korjattiin vain kuitupuuta leimikosta yksinpuin hakkuuna. Kuitupuu kuljetettiin kuormatraktorilla tienvarsivarastolle, josta se kuljetettiin puutavara-autolla sellutehtaalle.
- **Kuitupuun erillishankinta (Joukkokäsittely)**
  Hakkuussa pyrittiin hyödyntämään joukkokäsittelyä mahdollisuuksien mukaan, muutoin sama tuotantoketju kuin edellä.
- **Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/TV)**
  Tavanomainen nuorten metsien energiapuun hankintaketju, jossa hakattiin karsimatonta pienpuuta. Kokopuu kuljetettiin kuormatraktorilla tienvarsivarastolle. Haketus tienvarsivarastolla (TV), josta hakkeen kaukokuljetus hakeautolla energialaitokselle.
- **Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/KP)**
  Hakkuu ja metsäkuljetus kuten edellä. Kokopuun kaukokuljetus energiapuuautolla käyttöpaikalle (KP), jossa murskaus.
- **Energiapuun erillishankinta (Energiapuupaalit/KP)**
  Kokopuun paalaus energiapuupaaleiksi. Energiapuupaalit kuljetettiin kuormatraktorilla tienvarsivarastolle, josta paalien kaukokuljetus puutavara-autolla käyttöpaikalle (KP) haketettavaksi/murskattavaksi.
- **Integroitu hankinta (Kuitupuupaalit)**
  Kokopuun paalaus ja kuitupuupaalien metsäkuljetus tienvarsivarastolle, josta paalien kaukokuljetus puutavara-autolla sellutehtaalle.

- **Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Kuitupuu)**
  Aines- ja energiapuun integroitu hankinta ns. kahden kasan menetelmällä, eli kuitu- ja energiapuujakeet hakattiin eri kasoihin (esim. Kärhä 2008, Kärhä & Mutikainen 2008, Kärhä ym. 2009). Kuitupuujae kuljetettiin kuormatraktorilla tienvarsivarastolle, josta kaukokuljetus puutavara-autolla sellutehtaalle.
- **Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Energiapuu/TV)**
  Edellä kuvatun kahden kasan menetelmän energiajakeen metsäkuljetus tienvarsivarastolle (TV), jossa haketus ja edelleen hakkeen kaukokuljetus hakeautolla energialaitokselle.

Tuottavuusoletukset ja korjuuolot

Kuitupuun yksinpuin hakkuun tuottavuus laskettiin tutkimuksessa Kärhän ym. (2006a) ajanmenekkimalleilla olettaen, että keskipituudeltaan 1,5 metrin kuusialikasvosta oli leimikossa 500 runkoa/ha (liite 3). Kuitupuun joukkohakkuun tuottavuusmalli rakennettiin siten, että hakkuun oletettiin nopeutuvan rinnankorkeusläpimitaltaan 7–10 cm:n puilla 10–40 % (vrt. Lilleberg 1994, Bergkvist 2003, Kärhä ym. 2009) verrattuna kuitupuun yksinpuin hakkuuseen ensiharvennuksella (liite 3).

Kokopuun hakkuun tuottavuuden määrittämisessä käytettiin Kärhän ym. (2006b) (työpistesiirtymiset) ja Kärhän ja Mutikaisen (2008) (rungon käsittely) karsimattoman pienpuun hakkuun ajanmenekkiyhtälöitä. Integroidun hakkuun tuottavuus määritettiin Kärhän ja Mutikaisen (2008) tutkimuksen ajanmenekkimallilla (liite 3). Kuitupuun ja energiapuun erillishakkuun sekä integroidun hakkuun tehotuntituottavuus muunnettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,393. Kokopuun paalauksen tuottavuus laskettiin tässä työssä raportoiduilla ajanmenekkiyhtälöillä ja saatu tehotuntituottavuus muunnettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,460.

Kuitupuun metsäkuljetuksen tuottavuus keskiraskaalla kuormatraktorilla laskettiin Kärhän ym. (2006a) ja kokopuun metsäkuljetus Laitilan ym. (2007) ajanmenekkimalleilla. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus laskettiin puolestaan tässä hankkeessa laadituilla ajanmenekkimalleilla (Laitila ym. 2009). Kuormakooksi oletettiin kuitupuulla 11,0 m^3, kokopuulla 6,5 m^3 ja kokopuupaaleilla 22 paalia/kuorma (paalin koko taulukon 2 mukainen). Laskelmissa käytetty metsäkuljetusmatka oli 300 m (vrt. Kärhä 2007c). Kuormatraktorin tehotuntituottavuus muunnettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,302.

Karsittu mäntykuitupuu ja kokopuupaalit kuljetettiin käyttöpaikalle vakiorakenteisella puutavara-autolla. Mäntykuitupuulla kuormakoon oletettiin olevan 41 m^3 ja kokopuupaaleilla 42 m^3. Kokopuuhakkeen kaukokuljetuksessa käytettiin täysperävaunullista hakeautoa (kuormakoko 44 m^3). Kokopuun kaukokuljetuksessa käytettiin energiapuuautoa, jossa kuormakoko oli 22 m^3.

Laskelmissa pitkän (5 m) mäntykuitupuun kokonaiskuormausaika oli 53 min/kuorma. Kokopuupaalien kuormausaikana käytettiin 71 min/kuorma (Laitila ym. 2009). Kokopuun kuormauksen ajanmenekki oli 92 min/kuorma. Kokopuuhakkeella kuormauksen ajanmenekki oli 106 min/kuorma. Kuitupuun ja kokopuupaalien autokuorman purkuaika oli apuaikoineen 29 minuuttia ja työ tehtiin kurottajatrukilla. Hakeauton kokonaispurkuaikana käytettiin 34 min/kuorma ja energiapuuautolla 35 min/kuorma. Kaukokuljetusmatkaksi oletettiin 100 km (vrt. Kariniemi 2009).

Tuotantoketjujen kannattavuustarkastelussa korjuukohteiden (pienirunkoisten ensiharvennusmänniköiden) oletettiin olevan samantyyppiset kuin kokopuun paalauksen aikatutkimuksessa (taulukko 2); poistuman rinnankorkeusläpimitan ja keskitilavuuden yhteyden määrittämisessä hyödynnettiin kokopuun paalauksen aikatutkimuksessa mitattuja leimikkotunnuksia. Kuitupuulle sovellettiin yleisiä kuitupuun mitta- ja laatuvaatimuksia eli kuitupuupölkyn pituus oli 2,7–5,0 m ja minimilatvaläpimitta 6 cm. Poistuman keskikoon avulla määritettiin poistuman tiheys sekä kuitupuun erilliskorjuukohteilla (Kärhä 2007c) että kokopuun erilliskorjuun ja integroidun korjuun työmailla (Kärhä ym. 2006b). Kokopuupaalin tilavuus oli 0,36–0,59 m^3 (taulukko 2) ja se laskettiin poistuman keskikoon suhteen kaavalla 3 (s. 34).

TAULUKKO 2. Hankintaketjujen vertailututkimuksen korjuuolot sekä kokopuupaalin koko kussakin poistuman järeysluokassa.

Poistuman rinnankorkeusläpimitta, cm	Kuitupuuna Poistuma			Kokopuuna/kokopuupaaleina Poistuma				Paalin koko, m^3
	dm^3	r/ha	m^3/ha	dm^3	r/ha	m^3/ha	m^3/ha (energiajae kahden kasan menetelmässä)	
5				10	4 492	45	45	
6				15	3 446	52	52	0,36
7	11	1 541	17	22	2 668	59	42	0,45
8	16	1 278	20	31	2 130	66	46	0,51
9	26	1 003	26	42	1 761	74	48	0,54
10	37	840	31	55	1 503	83	51	0,57
11	51	716	37	70	1 319	92	55	0,58
12	65	634	41	87	1 184	103	62	0,59
13	82	565	46	106	1 082	115	68	
14	103	504	52	128	1 002	128	76	
15	122	463	57	152	940	143	86	

Kustannusperusteet

Käyttötuntikustannukset metsäkoneille laskettiin Metsäteho Oy:n Puutavaran korjuukustannusten laskentaohjelmalla. Hakkuukoneen käyttötuntikustannukset olivat 81 €/h ja kuormatraktorin käyttötuntikustannukset 61 €/h. Fixteri-kokopuupaalaimelle saatiin 107 €:n käyttötuntikustannus. Fixteri-

koneyksikön hankintahinnaksi oletettiin 550 000 € (alv. 0 %). Autokuljetuksen kustannukset laskettiin puolestaan Metsäteho Oy:n Puutavaran autokuljetuskustannusten laskentaohjelmalla.

Kokopuun tienvarsihaketuksen kustannuksena käytettiin 8,0 €/m^3, kokopuupaalien käyttöpaikkamurskauksen kustannuksena 1,6 €/m^3 ja kokopuun käyttöpaikkamurskauksen kustannuksena 2,0 €/m^3. Vertailulaskelmissa tuotantokustannuksiin sisällytettiin kuitupuuvaihtoehdoissa myös puutavaran rumpukuorinnan ja haketuksen kustannukset (liitteet 4–6). Kun raaka-aineerästä (kuitupuu & kuitupuupaalit) tehtiin sellua, sille laskettiin 1,0 €/m^3:n terminaalikustannus tehtaalla. Yksinpuin hakatun kuitupuun kuorintakustannukset olivat 0,4 €/m^3. Vastaavasti joukkohakatun kuitupuun kuorintakustannukset olivat 0,5 €/m^3 ja kokopuupaalien kuorintakustannukset 0,8 €/m^3. Sellupuun haketuksen kustannuksena käytettiin 0,8 €/m^3. Kunkin hankintaketjun yleiskustannukset olivat 3,15 €/m^3 (vrt. Kariniemi 2009).

Kantohinnan oletettiin olevan erilliskorjatulla ensiharvennusmäntykuitupuulla, samoin kuin integroidusti korjatulla mäntykuitupuulla 11 €/m^3. Kokopuulla – sekä irtonaisena että paaleina korjattuna – kantohinta oli 6 €/m^3. Integroidussa korjuussa energiajakeella käytettiin kantohintana 4 €/m^3.

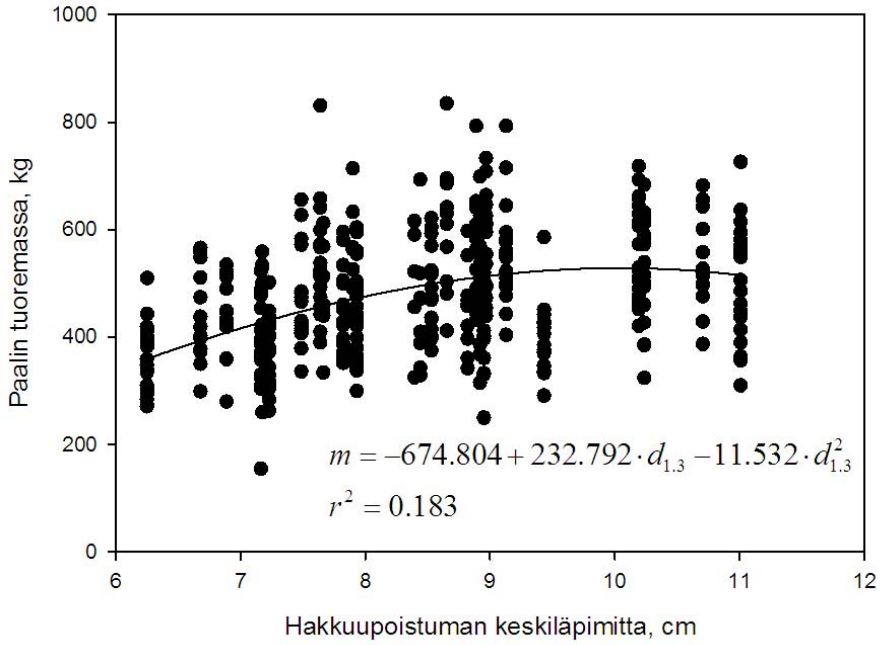
3 TULOKSET

3.1 Kokopuupaalien ominaisuudet

Paalauksen aikatutkimuskoealoilta korjattujen kokopuupaalien tuoremassa metsäkuljetuksen aikana (kuormainvaakapunnitus) oli keskimäärin 476 kg (keskihajonta 112 kg). Upotusmittaukseen kuuluneilla koealoilla kokopuupaalien keskimääräinen tuoremassa oli ennen upotusta 448 kg (keskihajonta 108 kg). Vastaavan paalierän kuormainvaakapunnituksessa saatu tuoremassa oli keskimäärin 450 kg/paali (keskihajonta 109 kg). Kuvassa 9 on esitetty hakkuupoistuman keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan vaikutus kokopuupaalien tuoremassaan paalauksen aikatutkimusaineistossa.

Upotusmittauksen ulkopuolelle jääneillä paalauksen aikatutkimuskoealoilla paalien kosteus oli välittömästi metsäkuljetuksen jälkeen keskimäärin 56 %. Teerikankaalla kokopuupaalien kosteus (55 %) oli hieman pienempi kuin Pyyvi-tilan leimikossa (56 %) (liite 2). Mitattujen kokopuupaalien keskiläpimitta oli 65 cm (keskihajonta 8 cm), ja paalien keskipituudeksi saatiin 268 cm (keskihajonta 9 cm).

Kokopuupaalien tuoretiheyden aritmeettinen keskiarvo oli koko upotusmittausaineistossa 906 kg/m^3 ja aikatutkimusaineistoon kuuluneilla koealoilla 900 kg/m^3 (taulukko 3). Paalauksen ajanmenekkimalleja laadittaessa käytetty tuoretiheys (910 kg/m^3) perustui tilakohtaisella hakkuukertymän tuoremassalla (kg/tila) painotettuun tuoretiheyden keskiarvoon puutavaran metsäkuljetuksen aikaan (taulukko 4).



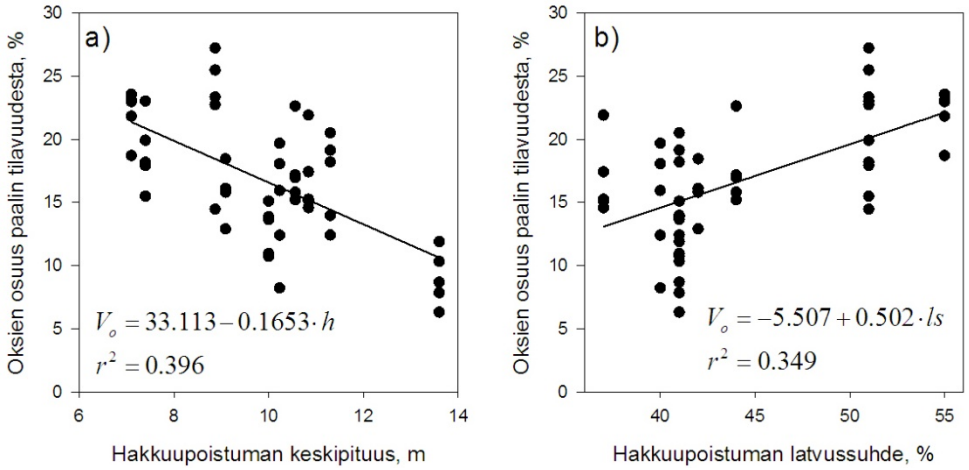
KUVA 9. Poistuman keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan vaikutus kokopuupaalin tuoremassaan paalauksen aikatutkimusaineistossa.

TAULUKKO 3. Kokopuupaalien tuoretiheyden aritmeettiset keskiarvot upotusmittausaineistossa.

Mittausvuosi	Upotettuja paaleja, kpl	Tuoretiheys, kg/m^3		
		Keskiarvo	Vaihteluväli	Keskihajonta
2008	15	950	911–988	23
2009	108	900	809–978	40
Koko aineisto	123	906	809–988	41

TAULUKKO 4. Aikatutkimusaineistoon kuuluneiden kokopuupaalien tuoretiheydet metsäkuljetuspäivänä ja upotusmittauksen aikana tiloittain sekä tilakohtaisilla hakkuukertymillä painotetut tuoretiheyksien keskiarvot.

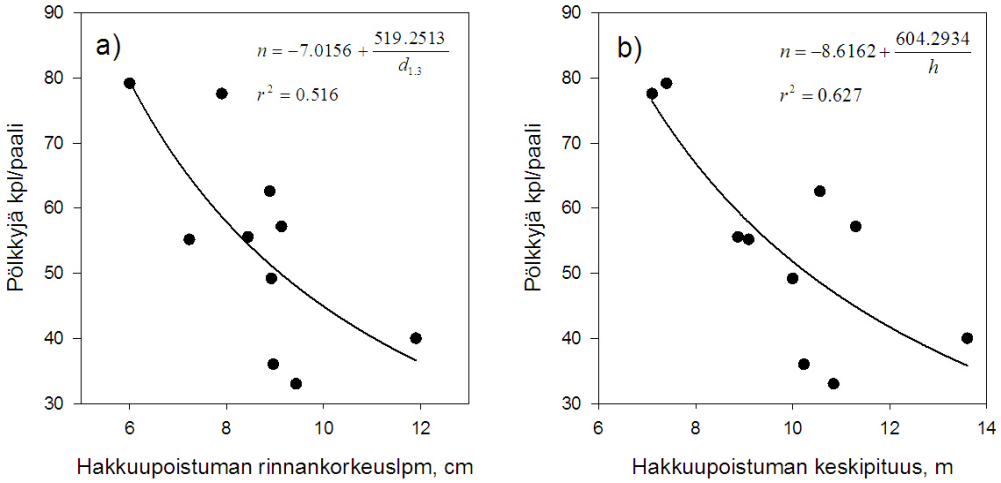
Tila	Paalien tuoremassa, kg	Tuoretiheys, kg/m^3	
		Metsäkuljetus-päivänä	Upotus-otanta
Teerikangas	90 950	886	872
Pyyvi	103 824	930	939
Koko aineisto	194 774	909	908



KUVA 10. Oksien tilavuusosuuden riippuvuus poistuman keskipituudesta (a) ja keskimääräisestä latvussuhteesta (b).

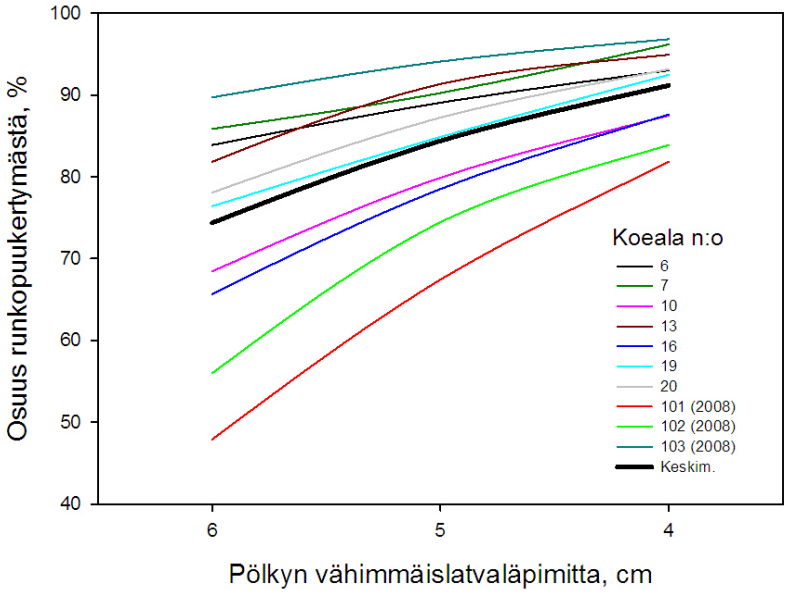
Lehtipuun laskennallinen osuus oli 3,3 % aikatutkimuksessa paalatusta puusta. Paalien kiintotilavuus oli keskimäärin 495 dm^3 (keskihajonta 103 dm^3), josta oksien osuus oli keskimäärin 16,7 % (keskihajonta 4,8 %-yks.). Oksien osuutta paalin kokonaistilavuudesta selittivät parhaiten hakkuussa poistettujen puiden keskipituus ja latvussuhde (elävän latvuksen osuus puun pituudesta) (kuva 10).

Hajotetut kuitupuupaalit sisälsivät keskimäärin 55 runkokappaletta (koealoittainen keskiarvo; minimi 33 kpl, maksimi 79 kpl, keskihajonta 16 kpl). Runkokappaleiden keskimääräinen tilavuus oli 6,3 dm^3, pituus 204 cm ja latvaläpimitta 4,9 cm. Paalikohtainen runkokappaleiden lukumäärä pieneni hakkuupoistuman keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan ja pituuden kasvaessa (kuva 11).

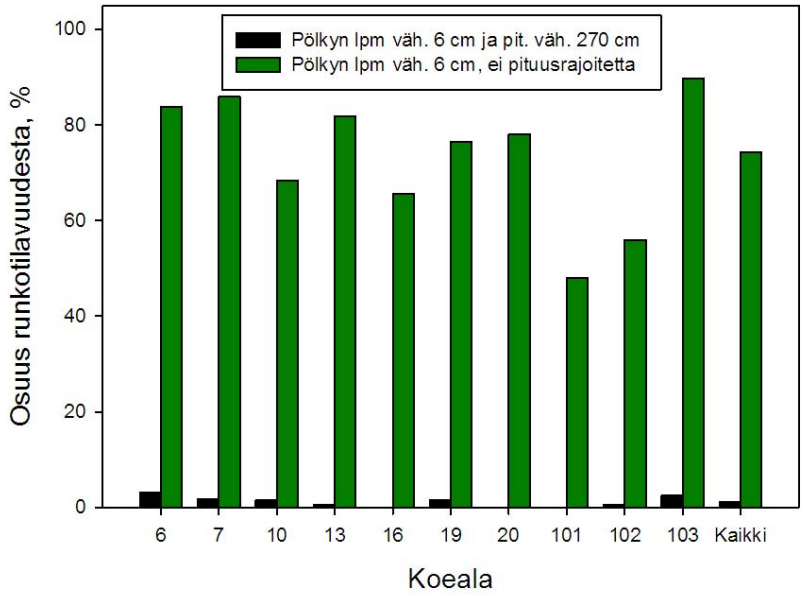


KUVA 11. Kokopuupaalien sisältämien pölkkyjen keskimääräisen lukumäärän riippuvuus poistuman keskimääräisestä rinnankorkeusläpimitasta (a) ja pituudesta (b).

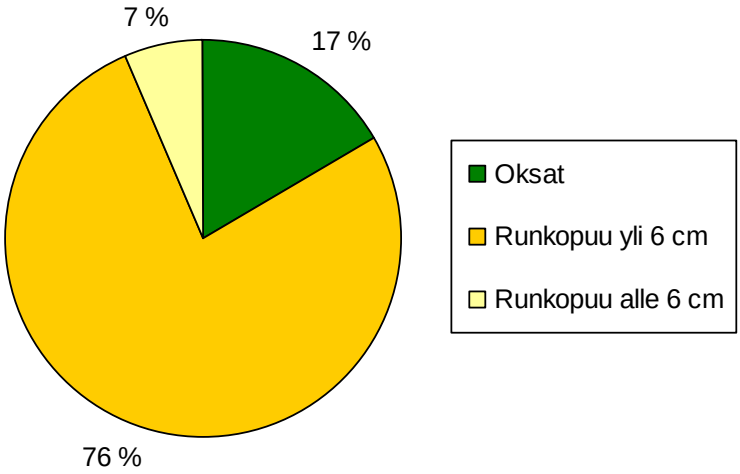
Keskimäärin 74 % koealoilta hakatusta kuorellisesta runkopuusta oli pölkyissä, joiden latvaläpimitta oli vähintään 6 cm (kuva 12). Kuitupuupölkyn vähimmäisläpimitat (6 cm ja 270 cm) täyttävää runkopuuta oli vain yksi prosentti koko pölkkyaineistosta (kuva 13).



KUVA 12. Kuorellisen runkotilavuuden suhteellinen jakaantuminen läpimittaluokkiin koealoittain (6–103) ilman pölkyn pituusrajoitteita.



KUVA 13. Latvaläpimitaltaan vähintään 6 cm pölkkyjen osuus runkotilavuudesta koealoittain.



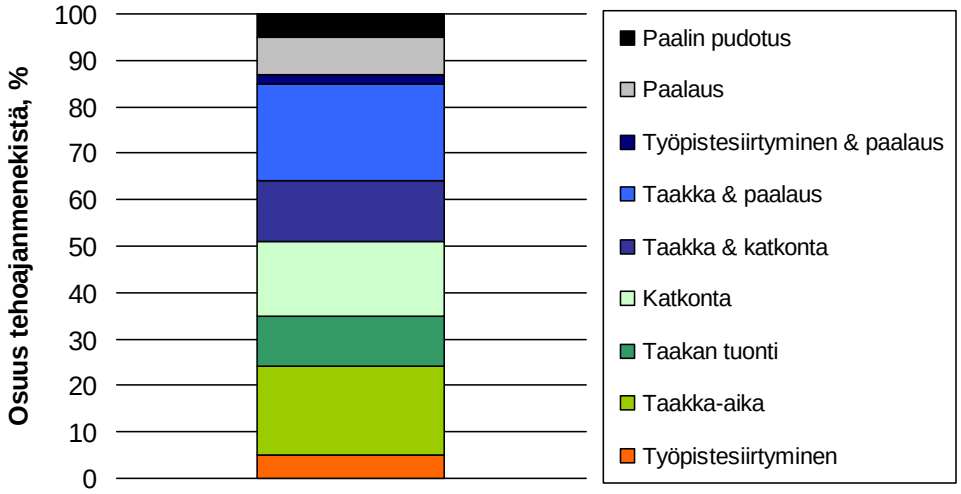
KUVA 14. Koostumukseltaan keskimääräisen paalin kiintotilavuuden jakaantuminen oksiin sekä alle ja yli 6 cm kuorellisiin pölkynosiin.

Koostumukseltaan keskimääräisen paalin kiintotilavuudesta oli 76 % vähintään 6 cm paksua kuorellista runkopuuta ilman pölkyn pituudelle asetettuja rajoitteita (kuva 14).

3.2 Kokopuun paalaus

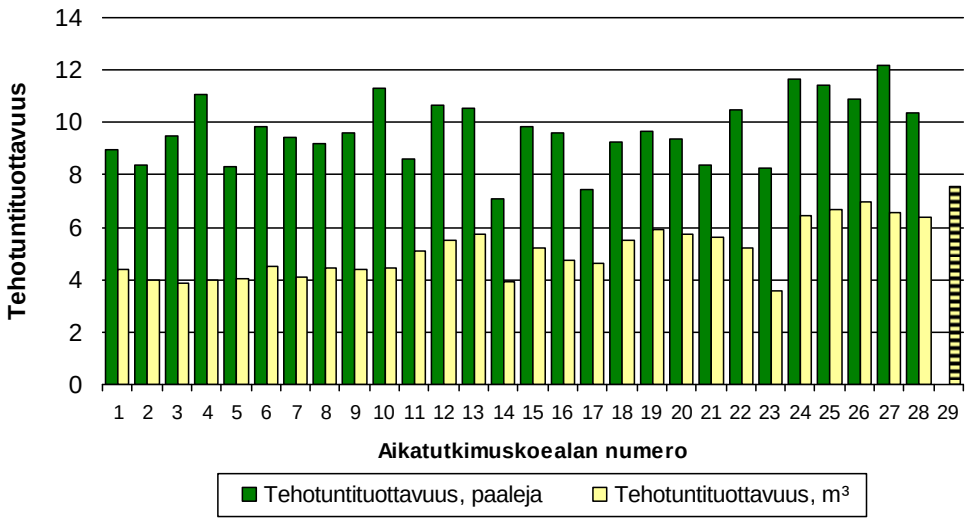
Tehoajanmenekin rakenne ja tuottavuus aikatutkimuskoealoilla

Työntutkijan 2 työvaihejaottelun mukaan kokopuun paalauksen tehotyöajasta kului 19 % puiden hakkuuseen ja keruuseen (Taakka-aika) ja 16 % puiden katkontaan paalaimessa (kuva 15). Taakan tuontiin paalaimelle kului keskimäärin 11 % tehotyöajasta ja työpistesiirtymisiin 5 %. Paalin tiivistyksen ja sitomisen (Paalaus) osuus oli 8 %, ja paalin pudottamiseen yms. järjestelyihin kului 5 % tehotyöajasta. Samanaikaisesti tapahtuvan paalaukseen ja hakkuun osuus oli 21 % tehotyöajasta ja hakkuun ja katkonnan 13 %. Työpistesiirtymisen aikana tapahtuneen paalauksen osuus oli puolestaan 2 % (kuva 15).



KUVA 15. Kokopuun paalauksen työvaiheiden keskimääräiset osuudet tehoajanmenekistä työntutkijan 2 työvaihejaottelun mukaan.

Kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus vaihteli aikatutkimuskoealoittain välillä 7,1–12,2 paalia/h (kuva 16). Kiintokuutiometreinä ilmaistuna tehotuntituottavuus oli 3,6–7,0 m^3/h. Korkein kokonaistuottavuus (7,5 m^3/tehotunti) saavutettiin aikatutkimuskoealalla 29, jossa tyvet ja oksattomat välipölkyt hakattiin silmävaraisesti viisimetriseksi kuitupuuksi ja ainoastaan latvukset paalattiin. Em. koealalla latvojen paalauksen tehotuntituottavuus oli 5,8 paalia/h (3,0 m^3/h). Silmävaraisesti katkottujen mäntykuitupuupölkkyjen tuorepaino määritettiin kuormainvaakamittauksella ja tuorepaino muunnettiin kiintokuutiometreiksi tuoretiheysluvulla 888 kg/m^3 (Lindblad, suullinen tiedonanto 2009).



KUVA 16. Kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus aikatutkimuskoealoittain.

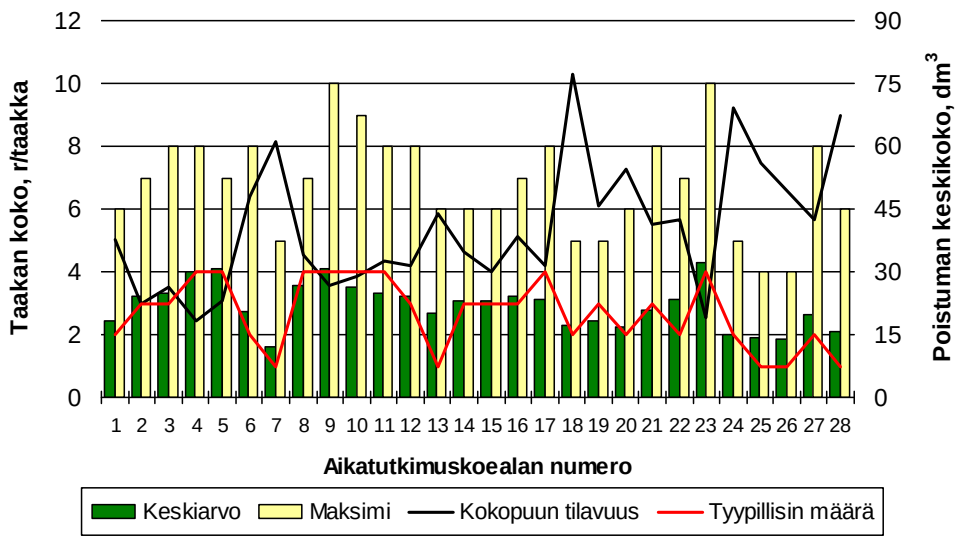
Kokopuupaalaimesta johtuneiden alle 15 minuutin keskeytysten ja häiriöiden osuus vaihteli tehoaikaan suhteutettuna välillä 3–42 % ja koealoittainen keskiarvo oli 12 %. Eniten keskeytyksiä ja häiriöitä aiheuttivat paalin sidontanarun pyöritykseen liittyvät ongelmat, kokopuurunkojen paalauspituuteen katkonnassa sahausraon tukkeutuminen sekä paalaimen liikkuvien osien väliin jumiutuneet puunkappaleet.

Aikatutkimuksessa keskimäärin 80 % korjatuista puista hakattiin joukkokäsittelynä, eli yhteen kourataakkaan kerättiin kaksi tai useampia puita. Suurimmillaan joukkokäsittelyprosentti oli lähes sata (96 %) ja alimmillaan 40 %. Poistuman keskikoon kasvu laski joukkokäsittelyprosenttia.

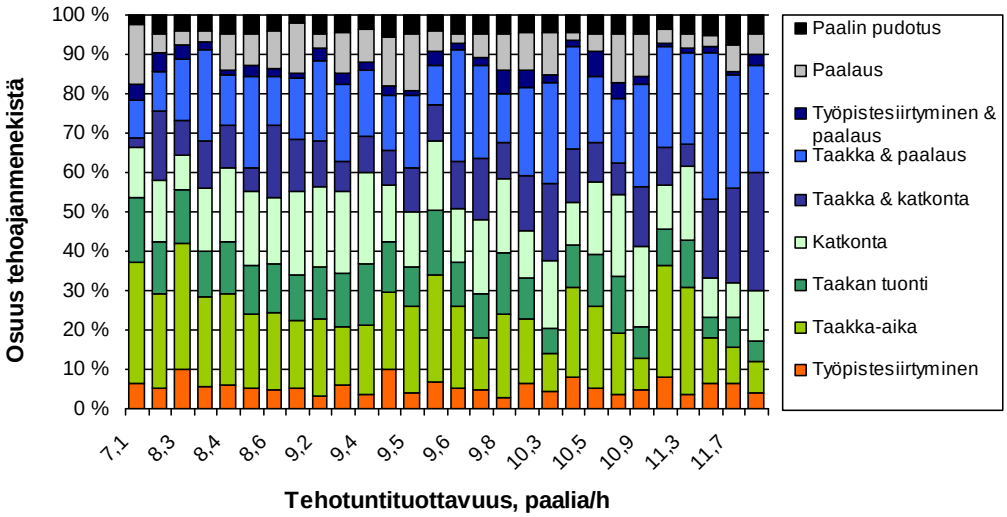
Aikatutkimuksessa taakkakoko oli keskimäärin 2,9 puuta/taakka. Suurimmissa taakoissa oli jopa 10 puuta (kuva 17). Poistuman keskikoon kasvu laski taakkakokoa ja vastaavasti poistuman keskitilavuuden pieneneminen nosti sitä. Alimmillaan taakkakoko oli keskimäärin 1,6 puuta/taakka ja korkeimmillaan 4,3 puuta/taakka (kuva 17).

Työvaiheiden samanaikaisuus paransi kokopuun paalauksen tuottavuutta (kuvat 18 ja 19). Sekä kokopuupaaleina että kiintokuutiometreinä mitattuna tuottavuus oli suurimmillaan, kun työvaiheiden samanaikaisuus oli suurimmillaan. Aikatutkimuksessa samanaikaisesti tehtyjen työvaiheiden osuus oli keskimäärin 35 % tehotyöajasta. Suurimmillaan työvaiheiden samanaikaisuus oli 60 % ja alimmillaan 16 % (kuva 18).

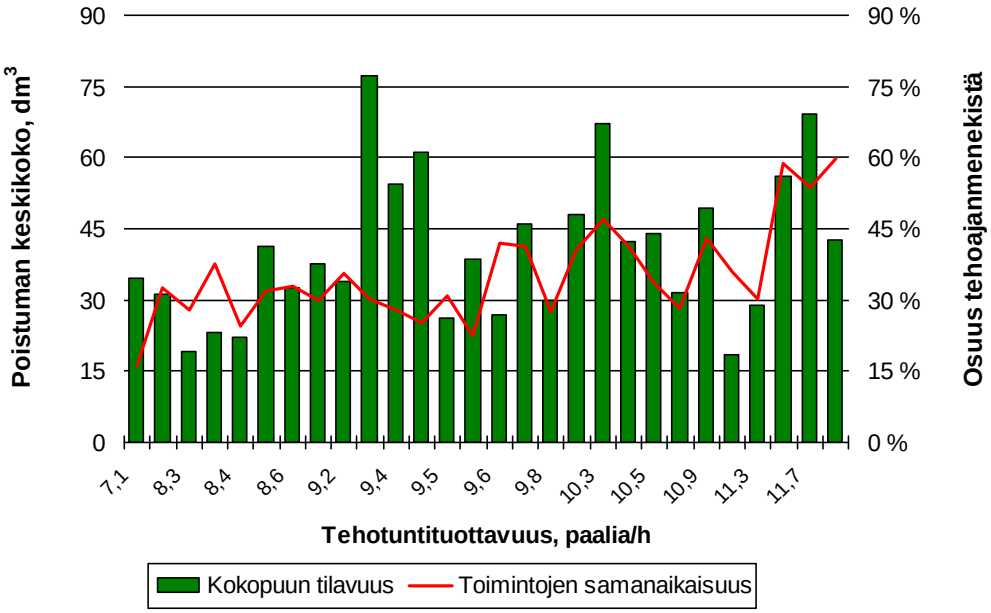
Poistuman keskikoon kasvu paransi jonkin verran työvaiheiden samanaikaisuutta, mutta vaikutus ei ollut aivan suoraviivainen eikä yksiselitteinen (kuva 19). Suurilla puilla runkojen käsittely ja paalauspituuteen katkonta vaativat tavallista enemmän kuljettajan huomiota, jolloin samanaikaiset toiminnot olivat käytännössä mahdottomia.



KUVA 17. Taakkakoko aikatutkimuskoealoittain.



KUVA 18. Työvaiheiden suhteellinen ajanmenekki kokopuun paalauksessa aikatutkimuskoealoittain tuottavuuden mukaisessa järjestyksessä.



KUVA 19. Kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus poistetun puun keskikoon ja työvaiheiden samanaikaisuuden suhteen.

Kokopuun paalauksen ajanmenekkimallit

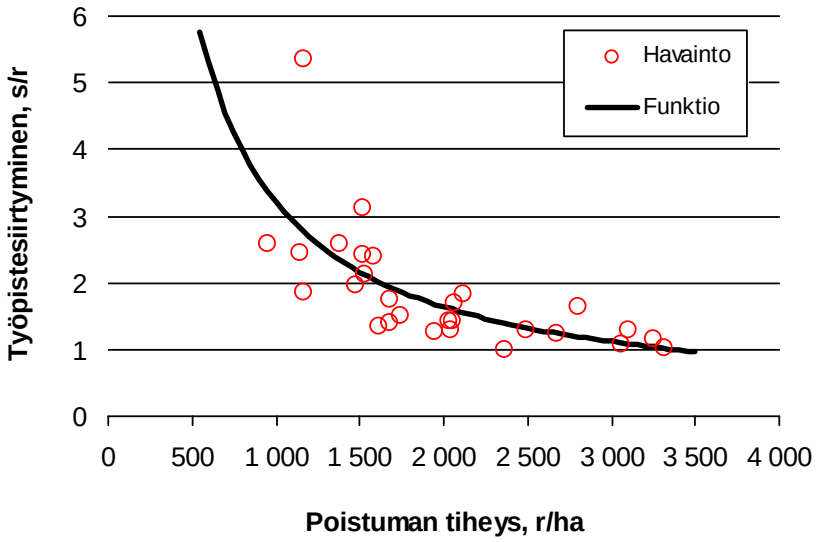
Kokopuun paalauksen ajanmenekin mallinnuksessa työvaiheet koottiin kolmeksi päätyövaiheeksi, jotka olivat työpistesiirtyminen, hakkuu ja paaliksi prosessointi.

Työpistesiirtyminen

Kokopuun paalauksen työpistesiirtymisen ajanmenekkiä selitettiin hakkuupoistuman tiheydellä (kuva 20). Poistuman tiheyden kasvaessa puukohtainen työpistesiirtymisen ajanmenekki pieneni, kun samasta työpisteestä voitiin käsitellä useampia puita. Työvaihe alkoi, kun koneyksikkö lähti liikkeelle ja päättyi, kun hakkuulaitteen vienti poistettavalle puulle alkoi. Kokopuun paalauksen työpistesiirtymisen ajanmenekkimalli oli muotoa (kaava 1, kuva 20):

$$T_{TP-Siirto} = 0{,}074 + 3130{,}29 * \frac{1}{x} \qquad (1)$$

$T_{TP-Siirto}$ = Työpistesiirtymisen ajanmenekki, s/r
x = Poistuman tiheys, r/ha
r^2 = 0,46



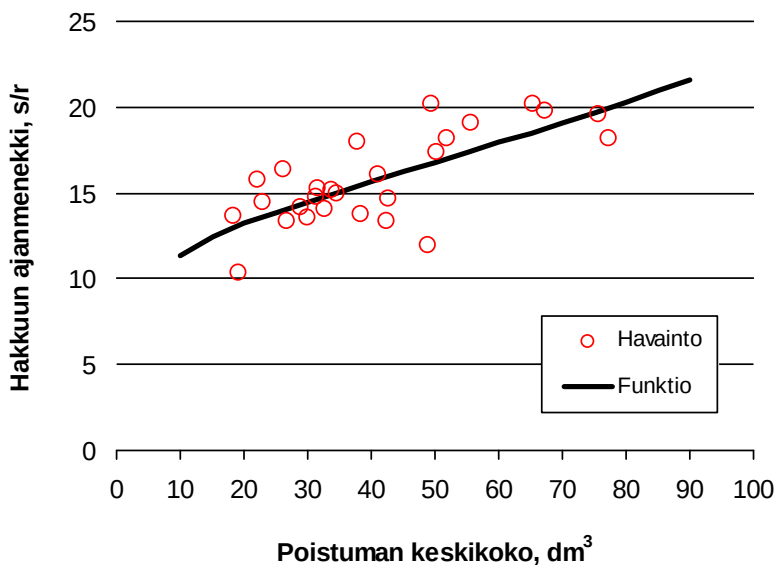
KUVA 20. Kokopuun paalauksen työpistesiirtymisen ajanmenekki hakkuupoistuman tiheyden suhteen.

Hakkuu

Hakkuuaika piti sisällään hakkuulaitteen viennin puulle, puiden hakkuun ja hakkuulaitteeseen keruun, taakan tuonnin paalaimelle sekä puunipun syöttämisen paalaimeen. Hakkuussa puukohtaiseen ajanmenekkiin vaikutti eniten hakattavan puuston keskikoko. Hakkuun ajanmenekille laadittiin malli, jossa ajanmenekkiä selitettiin poistuman keskikoolla (kuva 21). Laadittu ajanmenekkimalli oli muotoa (kaava 2):

$$T_{Hakkuu} = 1{,}044*\mathrm{LN}(v - 4{,}999) + 9{,}027*e^{0{,}007*v} \qquad (2)$$

T_{Hakkuu} = Hakkuun ajanmenekki, s/r
v = Poistuman keskikoko, dm^3
r^2 = 0,51



KUVA 21. Poistuman keskikoon vaikutus hakkuun ajanmenekkiin.

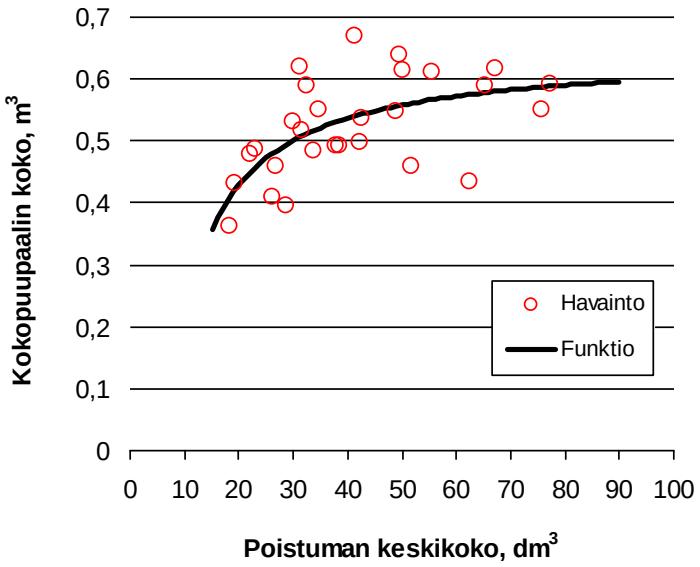
Paaliksi prosessointi

Paalauksen ajanmenekkiin luettiin mukaan kokopuiden katkonta paalaimessa paalauspituuteen, tiivistys ja paalaus, paalin pudotus sekä siihen liittyvät järjestelyt. Paaliksi prosessoinnin ajanmenekkiin vaikutti olennaisesti kokopuupaalin koko, ja etenkin se, montako kokopuurunkoa tarvittiin yhteen paaliin.

Paalin koolle laadittiin malli, jossa paalin tilavuutta selitettiin poistuman keskikoolla (kuva 22). Poistuman järeytyminen nosti paalin kiintotilavuusprosenttia ja sitä kautta paalin kokoa. Laadittu malli oli muotoa (kaava 3):

$$V_{Paali} = 0{,}644 - 4{,}299 * \frac{1}{v} \qquad (3)$$

V_{Paali} = Kokopuupaalin koko, m^3
v = Poistuman keskikoko, dm^3
r^2 = 0,37

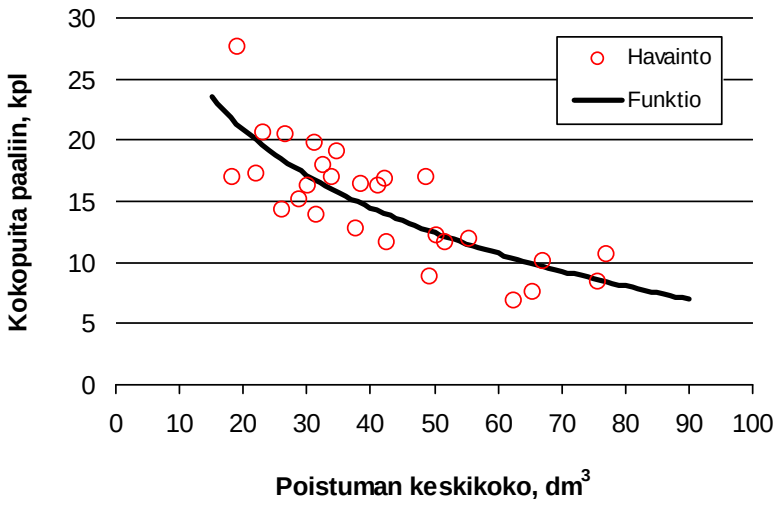


KUVA 22. Poistuman keskikoon vaikutus kokopuupaalin tilavuuteen.

Kokopuupaaliin tarvittavien puiden lukumäärälle laadittiin malli, jossa selittävänä tekijänä oli poistuman keskikoko (kuva 23). Laadittu malli oli muotoa (kaava 4):

$$T_{Puita} = 48{,}593 - 9{,}246 * \mathrm{LN}(v) \qquad (4)$$

T_{Puita} = Kokopuupaaliin tarvittavien kokopuurunkojen määrä, kpl
v = Poistuman keskikoko, dm^3
r^2 = 0,64

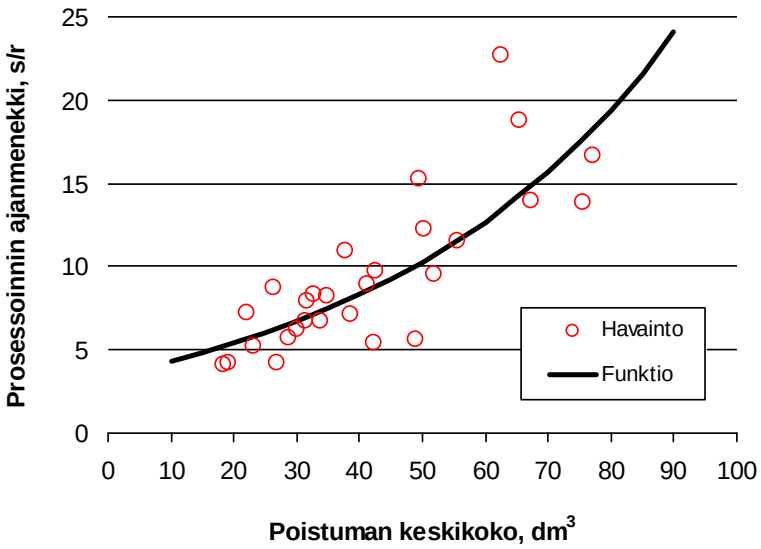


KUVA 23. Poistuman keskikoon vaikutus siihen, montako puuta tarvittiin yhteen kokopuupaaliin.

Paalin prosessointiajalle paalaimessa valmiiksi paaliksi laadittiin ajanmenekkimalli, jossa selittäjänä oli poistuman keskikoko (kuva 24). Paalin prosessointiaika kasvoi poistuman suuretessa, koska pitkillä puilla paalauspituuteen katkontaan kului aikaa enemmän kuin lyhyillä puilla. Lisäksi suuria puita syötettiin paalaimeen yksinpuin, kun taas pienillä puilla paalain pystyi käsittelemään kerralla jopa useamman kuin yhden kourataakan puut. Laadittu ajanmenekkimalli oli muotoa (kaava 5):

$$T_{Prosessointi} = 0{,}154*\mathrm{LN}(v - 4{,}999) + 3{,}227*e^{0{,}022*v} \qquad (5)$$

$T_{Prosessointi}$ = Paalin prosessoinnin ajanmenekki, s/r
v = Poistuman keskikoko, dm^3
r^2 = 0,65



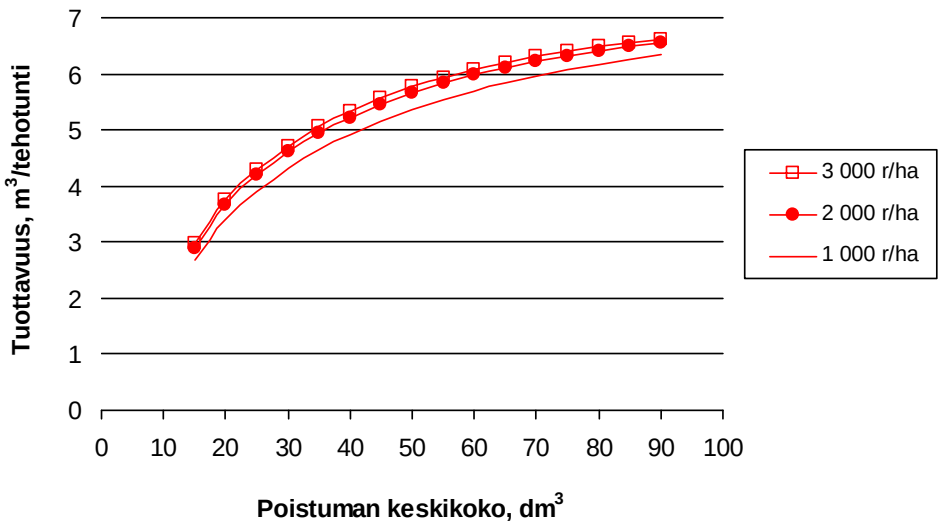
KUVA 24. Poistuman keskikoon vaikutus kokopuupaalin prosessointiajanmenekkiin.

Tuottavuuden mallinnus

Kokopuun paalauksen tehoajanmenekki paalia kohden, $T_{Paalaus}$ (sekuntia per kokopuupaali), saatiin osatyövaiheiden summana (kaava 6):

$$T_{Paalaus} = (T_{TP-Siirto} + T_{Hakkuu} + T_{Prosessointi})* T_{Puita} \quad (6)$$

Poistuman keskikoon ja tiheyden kasvu paransivat kokopuun paalauksen tuottavuutta (kuva 25). Poistuman keskikoon kasvu 20 dm^3:stä 75 dm^3:ään lähes kaksinkertaisti kokopuun paalauksen tehotuntituottavuuden, kun poistuman tiheys oli 1 000 r/ha: kun poistuma oli 20 dm^3, kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus oli 3,4 m^3/h ja 75 dm^3:n kokopuulla 6,1 m^3/h (kuva 25). Poistuman tiheyden kasvu 1 000 puusta/ha 3 000 puuhun/ha paransi 20 dm^3:n kokopuulla tehotuntituottavuutta 0,4 m^3/h ja 75 dm^3:n kokopuulla 0,3 m^3/h (kuva 25).



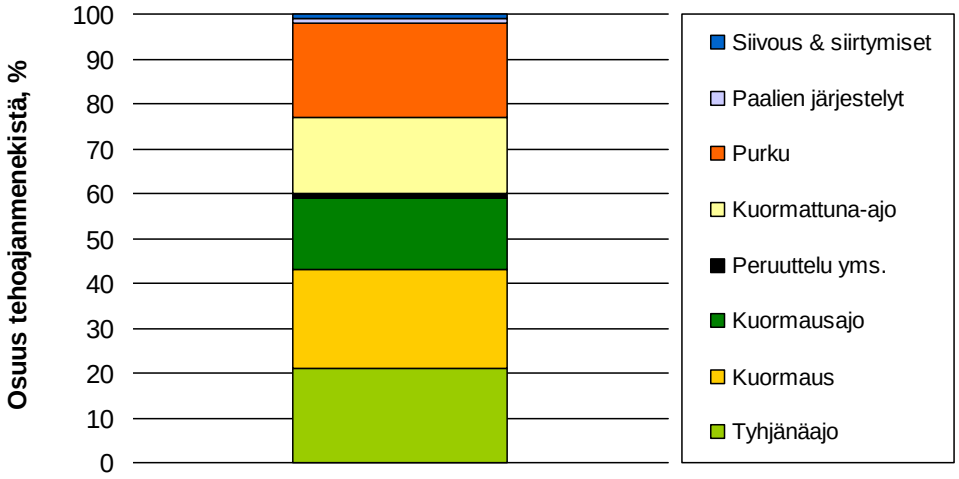
KUVA 25. Kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus poistuman keskikoon ja tiheyden suhteen.

3.3 Kokopuupaalien metsäkuljetus

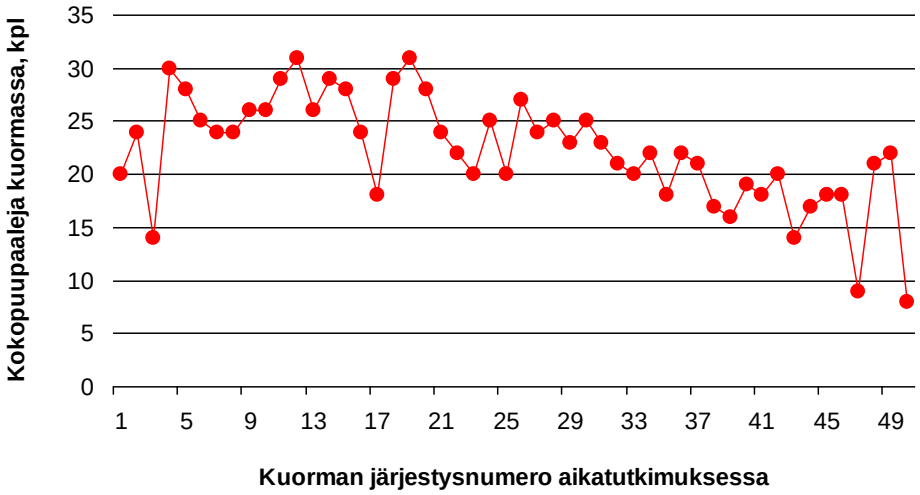
Tehoajanmenekin rakenne

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen aikatutkimuksessa kuormaukseen kului 22 % tehotyöajasta ja kuorman purkamiseen tienvarsivarastolla 21 % tehotyöajasta (kuva 26). Kun otetaan huomioon kuormatraktorin siirtymiset varastopaikalla, kokopuupaalien lajittelu ja varastopaikan siistimiseen kulunut aika, kuorman purkamisen liittyvien työvaiheiden ajanmenekki oli yhteensä 23 % tehotyöajasta. Kuormausajon osuus tehoajasta oli 16 % ja kuormausajoon liittyvän peruuttelun yms. osuus oli 1 % tehotyöajasta. Tyhjänäajon osuus oli 21 % ja kuormattuna-ajon 17 % tehotyöajasta (kuva 26).

Aikatutkimuksessa kuormakoko oli keskimäärin 22,3 kokopuupaalia, ja kuormakoko vaihteli välillä 8–31 kokopuupaalia (kuva 27).



KUVA 26. Kokopuupaalien metsäkuljetuksen päätyövaiheiden osuudet tehoajanmenekistä.



KUVA 27. Kokopuupaalikuormien koko aikatutkimuksessa.

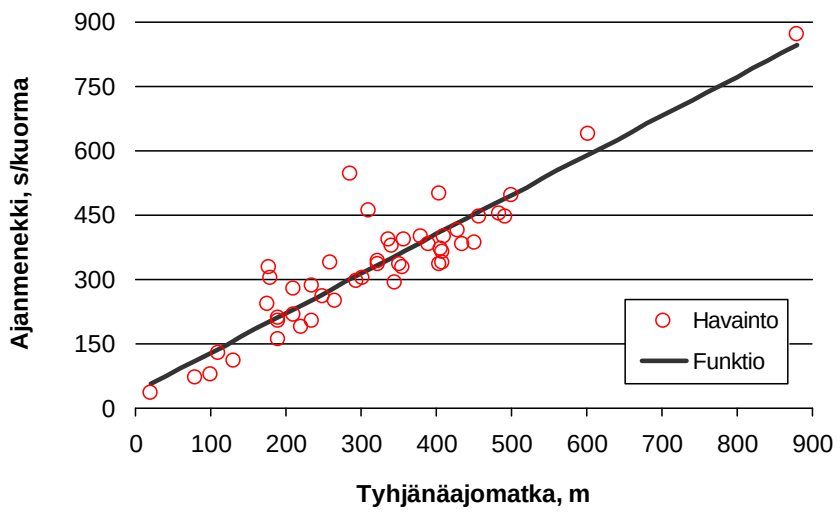
Kokopuupaalien metsäkuljetuksen ajanmenekkimallit

Tyhjänäajo

Kuormatraktorin tyhjänäajon ajanmenekkifunktiossa selittävänä tekijänä oli tyhjänäajomatka (kuva 28). Tyhjänäajon ajanmenekkifunktio oli muotoa (kaava 7):

$$T_{Tyhjäajo} = \frac{37{,}761 + 0{,}919 l_t}{v_k} \qquad (7)$$

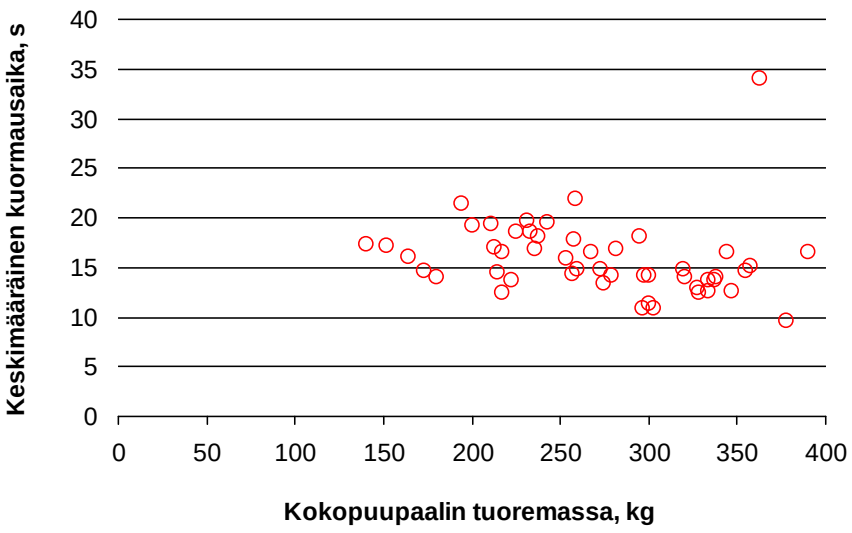
$T_{Tyhjä\text{-}ajo}$ = Tyhjänäajon ajanmenekki, s/paali
l_t = Tyhjänäajomatka, m
v_k = Kuormakoko, paalia/kuorma
r^2 = 0,84



KUVA 28. Tyhjänäajomatkan vaikutus tyhjänäajon ajanmenekkiin.

Kuormaus

Kokopuupaalien kuormausaika palstalla ($T_{Kuormaus}$) oli keskimäärin 15,8 sekuntia/paali, ja paalit kuormattiin yksitellen kuormatraktoriin. Kuormausaika määritettiin kuormakohtaisena keskiarvona, koska kokopuupaalien tuoremassalla ei havaittu olevan vaikutusta kokopuupaalin kuormausaikaan (kuva 29).



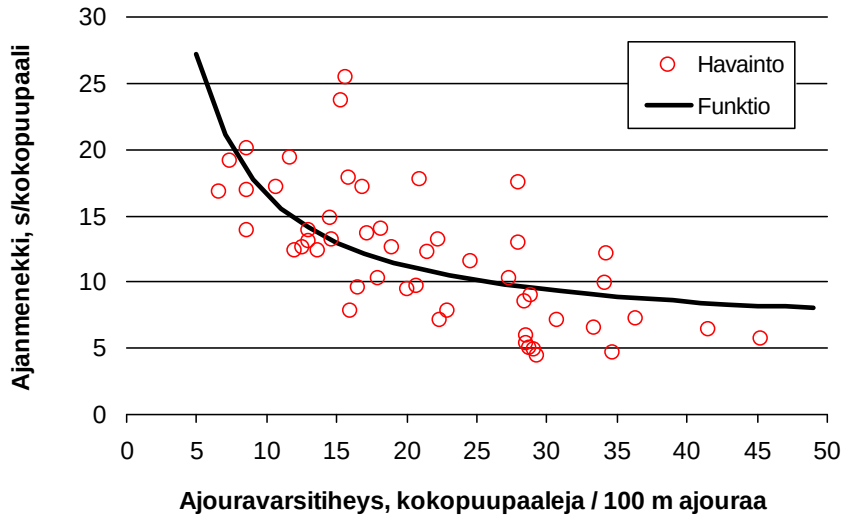
KUVA 29. Kokopuupaalien kuormauksen ajanmenekki kuormittain. Keskimääräinen kuormauksen ajanmenekki oli 15,8 s/paali.

Kuormausajo

Työpistesiirtojen määrä ja kuormausajomatka olivat yhteydessä kokopuupaalikertymään. Kuormausajon ajanmenekki kokopuupaalia kohden mallinnettiin kokopuupaalien ajouranvarsitiheyden (kokopuupaalia / 100 m ajouraa) suhteen (kuva 30, kaava 8). Varsinaiseen kuormausajon ajanmenekkiin lisättiin palstalla peruutteluun yms. keskimäärin kulunut aika, joka oli aikatutkimuksessa keskimäärin 15,3 s/kuorma.

$$T_{Kuormausajo} = 5{,}850 + \frac{106{,}904}{z} + a \qquad (8)$$

$T_{Kuormausajo}$ = Kuormausajon ajanmenekki, s/paali
z = Ajouranvarsitiheys, paalien lukumäärä / 100 m ajouraa
a = Kuormausajon apuaika: (15,3 s/kuorma)
r^2 = 0,39



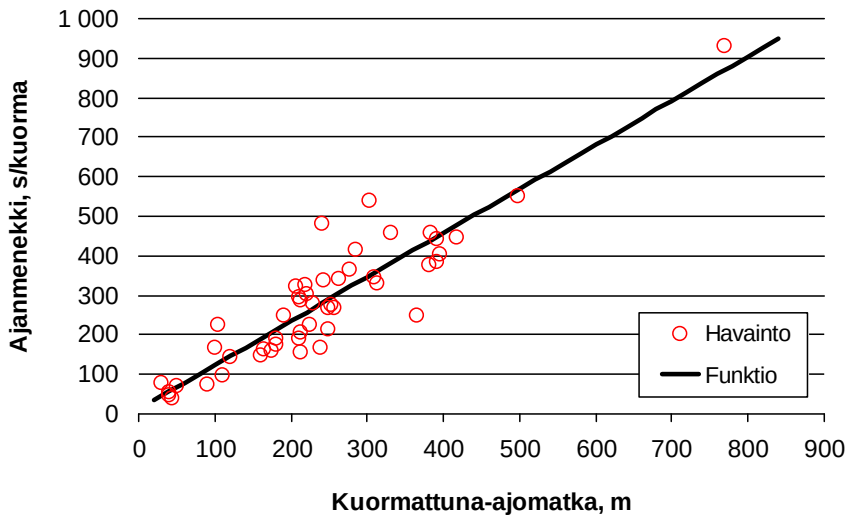
KUVA 30. Kokopuupaalien ajouravarsitiheyden vaikutus kuormausajon ajanmenekkiin.

Kuormattuna-ajo

Kuormatraktorin kuormattuna-ajon ajanmenekkifunktiossa selittävänä tekijänä oli kuormattuna-ajomatka (kuva 31). Ajonopeudet tyhjänä- ja kuormattuna-ajossa lyhyillä kuljetusmatkoilla olivat likimain samalla tasolla. Pitkillä matkoilla tyhjänäajo oli nopeampaa kuin kuormattuna-ajo. Kuormattuna-ajon ajanmenekkifunktio oli muotoa (kaava 9):

$$T_{Kuormattuna\text{-}ajo} = \frac{12{,}173 + 1{,}114\, l_k}{v_k} \qquad (9)$$

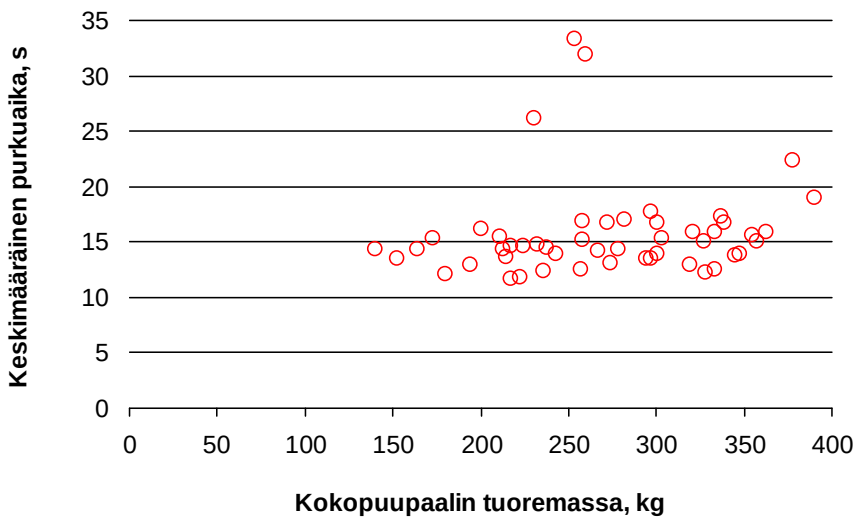
$T_{Kuormattuna\text{-}ajo}$ = Kuormattuna-ajon ajanmenekki, s/paali
l_k = Kuormattuna-ajomatka, m
v_k = Kuormakoko, paalia/kuorma
r^2 = 0,83



KUVA 31. Kuormattuna-ajomatkan vaikutus kuormattuna-ajon ajanmenekkiin.

Kuorman purku

Kokopuupaalikuorman keskimääräinen purkuaika (T_{Purku}) kokopuupaalia kohden oli 15,8 sekuntia. Metsäkuljetuksen tuottavuusmallissa purkuaika määritettiin kuormakohtaisena keskiarvona, koska kokopuupaalien keskimääräisellä tuoremassalla ei ollut vaikutusta purkuaikaan (kuva 32). Varastopaikan siistimiseen ja koneen siirtymisiin kuorman purkamisen aikana kului keskimäärin 19,0 s/kuorma ja kokopuupaalien lajitteluun ja järjestelyyn 26,0 s/kuorma silloin, kun kokopuupaaleja ajettiin sekakuormina. Sekakuormina ajetuista kokopuupaaleista kuitupuupaaleja oli 28 % ja 72 % energiapuupaaleja.



KUVA 32. Kokopuupaalikuorman purkamisen ajanmenekki kuormittain. Keskimääräinen kuorman purkamisen ajanmenekki oli 15,8 s/paali.

Tuottavuuden mallinnus

Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehoajanmenekki $T_{M\text{-}Kuljetus}$ (sekuntia per kokopuupaali) saatiin osatyövaiheiden summana (kaava 10):

$$T_{M\text{-}Kuljetus} = T_{Tyhjäajo} + T_{Kuormaus} + T_{Kuormausajo} + T_{Kuormattuna\text{-}ajo} + T_{Purku} \qquad (10)$$

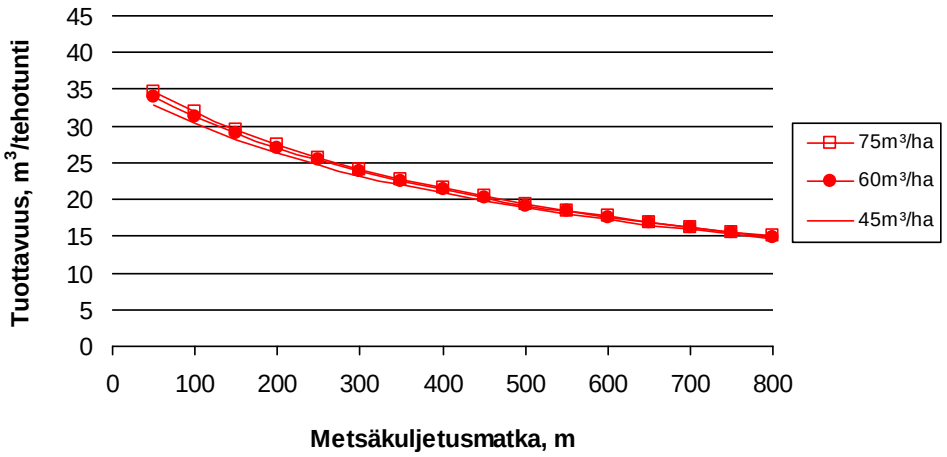
Kuormakohtainen ajanmenekki (T_{Kuorma}) saatiin kertomalla kokopuupaalikohtainen tehoajanmenekki ($T_{M\text{-}Kuljetus}$) kuormakoolla (v_k) (kokopuupaalien lukumäärä täydessä kuormassa) (kaava 11).

$$T_{Kuorma} = T_{M\text{-}Kuljetus} * v_k \qquad (11)$$

Kokopuupaalikohtainen ajanmenekki ($T_{M\text{-}Kuljetus}$) saatiin muutettua kiintokuutiometrikohtaiseksi tehotuntituottavuudeksi (m^3/h) kertomalla kokopuupaalikohtainen ajanmenekki kuormakoolla (v_k) ja jakamalla saatu tulo kokopuupaalin tilavuudella (V_{Paali}) (kaava 12)

$$m^3/h = \frac{T_{M\text{-}Kuljetus} * v_k}{V_{Paali}} \qquad (12)$$

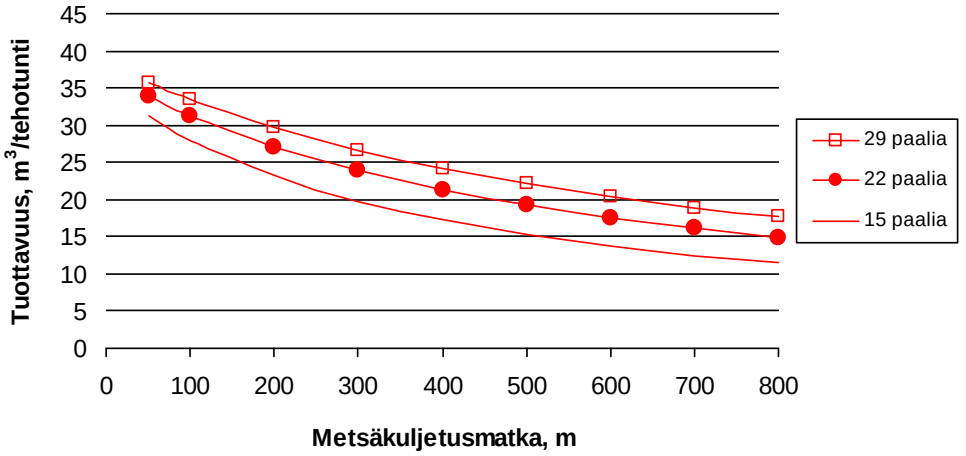
Kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus 0,5 m^3:n kokopuupaalikoolla oli 23,8 m^3 tehotunnissa, kun metsäkuljetusmatka oli 300 metriä, kuormakoko 22 kokopuupaalia ja hakkuukertymä 60 m^3/ha (kuva 33). Hakkuukertymällä oli vähäinen merkitys kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuuteen, koska paalit oli jo paalauksen yhteydessä esikasattu ajouran varteen (kuva 33) ja siirtymisaika paalilta toiselle on keskimäärin vain muutamia sekunteja (kuva 30).



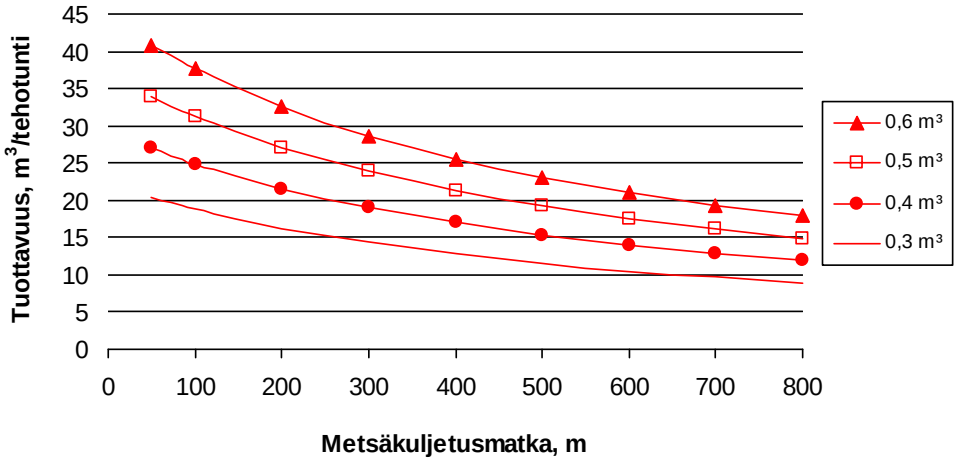
KUVA 33. Metsäkuljetusmatkan ja hakkuukertymän vaikutus kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehotuntituottavuuteen, kun kuormakoko oli 22 paalia ja kokopuupaalien keskikoko 0,5 m^3.

Kuormakoon kasvattaminen 22 kokopuupaalista 29 kokopuupaaliin lisäsi metsäkuljetuksen tuottavuutta 2,8 m^3 tehotunnissa, kun metsäkuljetusmatka oli 300 m. Vastaavasti kuormakoon pieneneminen 22 kokopuupaalista 15 kokopuupaaliin laski tuottavuutta 4,0 m^3 tehotunnissa (kuva 34).

Kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia, kokopuupaalin koon pieneneminen 0,5 m^3:stä 0,4 kiintokuutiometriin laski metsäkuljetuksen tuottavuutta 300 metrin metsäkuljetusmatkalla 4,8 m^3 tehotunnissa. Vastaavasti paalin kiintotilavuuden kasvu 0,5:stä 0,6 kiintokuutiometriin paransi metsäkuljetuksen tuottavuutta 4,8 m^3 tehotunnissa (kuva 35).



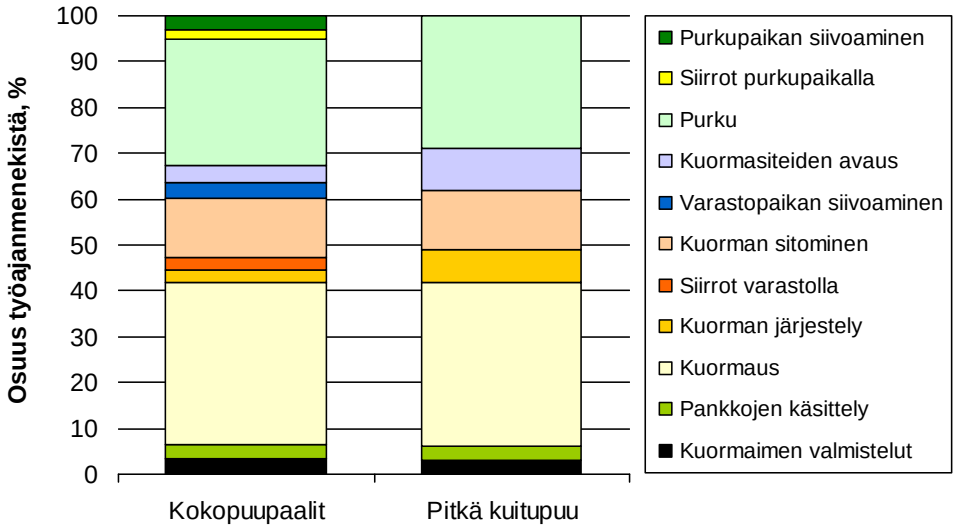
KUVA 34. Kuormakoon vaikutus kokopuupaalien metsäkuljetuksen tehotuntituottavuuteen, kun kokopuupaalin keskikoko oli 0,5 m^3 ja hakkuukertymä 60 m^3/ha.



KUVA 35. Kokopuupaalin koon vaikutus metsäkuljetuksen tehotuntituottavuuteen, kun kuormakoko oli 22 kokopuupaalia ja hakkuukertymä 60 m^3/ha.

3.4 Kokopuupaalien kaukokuljetus

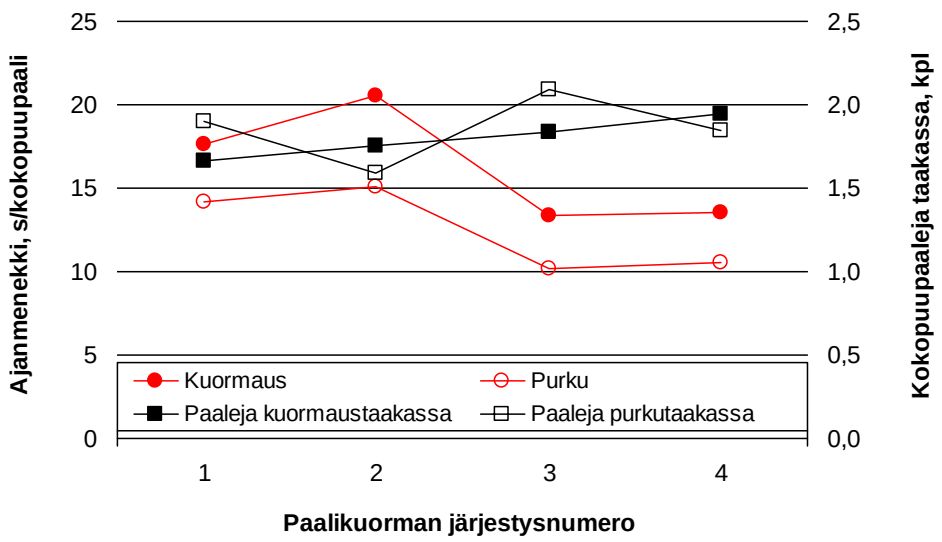
Aikatutkimuksessa kokopuupaalien ja pitkän (5 m) mäntykuitupuun kuormauksen ja purkamisen työvaiheiden ajanmenekkijakauma oli samantyyppinen molemmilla puutavaralajeilla (kuva 36). Kuormauksen osuus oli 36 % tehoajanmenekistä sekä paaleilla että pitkällä mäntykuitupuulla. Purkutyön osuus oli 29 % kuitupuulla ja 27 % paaleilla. Kuorman sitomiseen kului molemmilla puutavaralajeilla 13 % tehotyöajasta ja kuormasiteiden avaamiseen 4–9 % tehotyöajasta. Paaleilla kuormauspaikan siivoamiseen ja kuorman siistimiseen kului 4 % tehotyöajasta ja purkupaikan siivoamiseen 3 % tehotyöajasta. Kuitupuulla kuormaus- ja purkupaikkojen siivoamiseen ei kulunut aikaa, koska tienvarsipinossa ei ollut irrallisia oksia.



KUVA 36. Kuormauksen ja purkamisen työvaiheiden osuudet tehoajanmenekistä kokopuupaalien ja pitkän (5 m) mäntykuitupuun autokuljetuksessa.

Kuormaimen valmisteluun kuormaus- ja purkutyön alussa ja siirtojen jälkeen kului 3–4 % tehotyöajasta. Pankkojen liikutteluun kuormaus- ja purkutyön ohessa kului aikaa 3 % ja kuorman järjestelyyn 2–7 % (kuva 36). Paaleilla siirtoihin kuormaus- ja purkupaikalla kului aikaa yhteensä 5 % tehotyöajasta. Paaleilla kuorma koostui viidestä nipusta, kun taas pitkällä kuitupuulla täyteen kuormaan tarvittiin kolme nippua. Paaleilla viisi nippua ei ollut kuormattavissa tai purettavissa samasta pisteestä, joten autoa oli siirrettävä välillä. Pitkällä kuitupuulla kuorman teko ja purku onnistui samasta pisteestä ilman siirtymisiä.

Kokopuupaalien kuormauksen ajanmenekki oli keskimäärin 3,8 s/paali korkeampi kuin paalien purkamisen ajanmenekki (kuva 37): paalien kuormaukseen kului aikaa keskimäärin 16,3 s/paali ja purkamiseen 12,5 s/paali. Autokuormien välillä kuormauksen ajanmenekki vaihteli välillä 13,4–20,5 s/paali. Purkutyössä paalikohtainen vaihtelu oli 10,2–15,1 sekuntia (kuva 37). Kuormaustaakassa oli keskimäärin 1,8 paalia ja purkutaakassa 1,9 paalia. Kuormaustaakan koko vaihteli välillä 1,7–1,9 paalia ja purkutaakan kokovaihtelu oli 1,6–2,1 paalia (kuva 37).



KUVA 37. Kokopuupaalien kuormauksen ja purkamisen keskimääräiset ajanmenekit autokuormittain sekä kuormaus- ja purkutaakkojen keskikoko.

Taulukkoon 5 on koottu kokopuupaalien ja kuitupuun kuormaus- ja purkutyön keskimääräiset ajanmenekit työvaiheittain. Kuormaimen valmistelun, pankkojen käsittelyn, kuorman järjestelyn, siirtojen, kuorman sitomisen ja avaamisen sekä siivoamisen tehoajanmenekit laskettiin kuormakohtaisina keskiarvoina aikatutkimusaineistosta. Taulukossa 5 paalien kuormauksen ja purkamisen ajanmenekki laskettiin autokuormalle, jonka koko oli 90 paalia; paalin kiintotilavuudeksi oletettiin 0,39 m^3. Mäntykuitupuun kuormakoko, samoin kuin kuormauksen ja purkamisen ajanmenekki perustuivat suoraan aikatutkimustuloksiin. Em. laskentaperusteilla kuorman teon ja junan vaunuun purkamisen tehoajanmenekki oli paaleilla 3 985 sekuntia eli 66 minuuttia. Kuitupuulla vastaava tehoajanmenekki oli 2 724 sekuntia eli 45 minuuttia (taulukko 5). Paaleilla tuottavuutta alensivat siivouksen ja kuorman siistimisen lisäajanmenekki, siirrot kuormaus- ja purkutyön yhteydessä ja kuormaimen valmistelut siirtojen jälkeen.

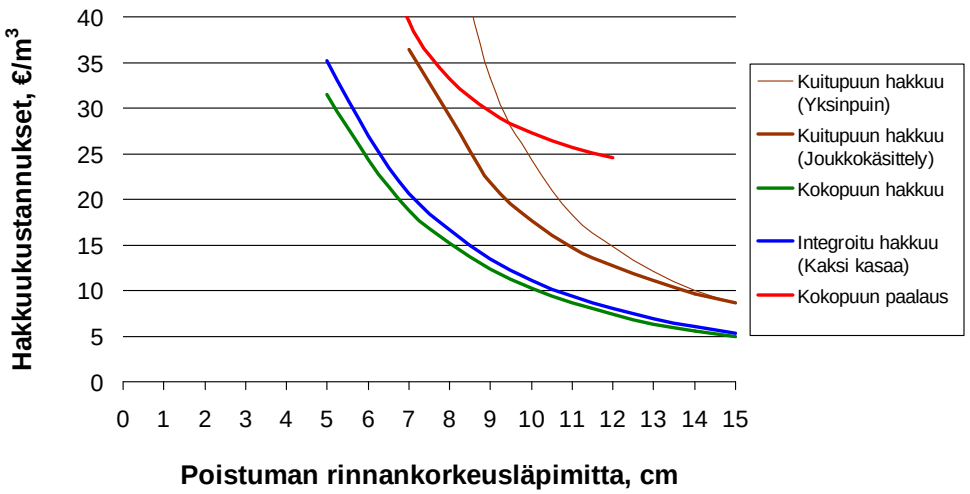
TAULUKKO 5. Kuormauksen ja purkamisen työvaiheiden keskimääräiset tehoajanmenekit kokopuupaaleilla ja pitkällä (5 m) mäntykuitupuulla aikatutkimuksessa. Kokopuupaaleilla kuormakoko oli 90 paalia eli 35,1 m^3 (paalin keskikoko 0,39 m^3). Pitkällä mäntykuitupuulla kuormakoko oli aikatutkimuksessa toteutunut (37,9 m^3).

Työvaihe	Kokopuupaalit (35,1 m^3; 90 paalia)	Pitkä mäntykuitupuu (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

3.5 Tuotantoketjujen vertailulaskelmat

Korjuu- ja kaukokuljetuskustannukset

Kuvassa 38 on esitetty tuotantoketjujen vertailulaskelmissa käytetyt hakkuukustannukset. Kuvasta nähdään, että hakkuun kustannukset muodostuvat varsin korkeiksi kokopuun paalauksessa verrattuna kuitu- ja kokopuun erillishakkuuseen sekä integroituun hakkuuseen. Toisaalta on muistettava, että kokopuun paalaus -tuotantoketjun hakkuukustannuksissa on mukana kustannukset, jotka aiheutuvat hakattujen puiden prosessoinnista paaleiksi. Kokopuun paalauksen kustannukset alittavat vain kuitupuun yksinpuin hakkuun kustannukset, kun poistuman rinnankorkeusläpimitta on alle 9 cm.



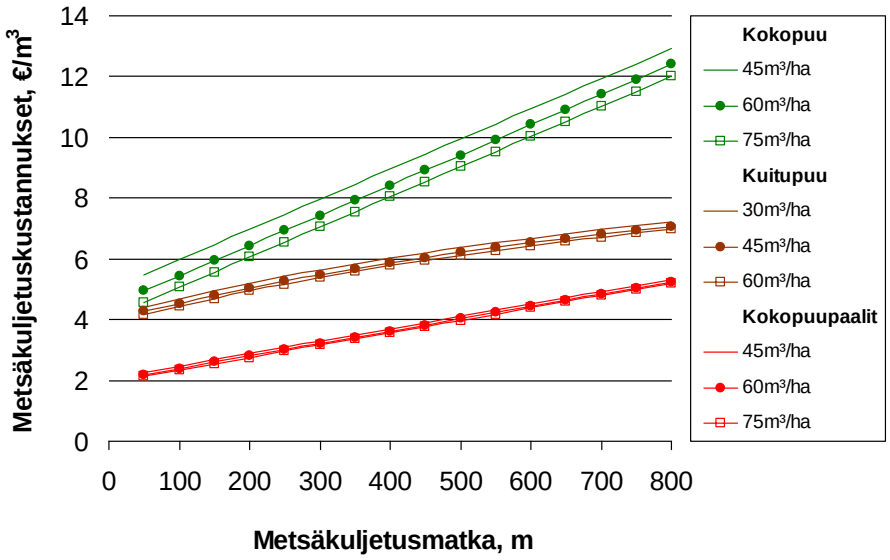
KUVA 38. Kuitu- ja kokopuun hakkuukustannukset erilliskorjuussa ja integroidussa korjuussa ns. kahden kasan menetelmällä sekä kokopuun paalauksen kustannukset. Korjuuolot taulukon 2 mukaiset poistuman järeysluokittain.

Merkittävä kustannussäästö kokopuun paalaus -tuotantoketjulla saavutettiin metsäkuljetuksessa (kuva 39): kokopuun metsäkuljetuksen kustannukset olivat yli kaksinkertaiset verrattuna kokopuupaalien metsäkuljetukseen, ja ensiharvennuskuitupuunkin metsäkuljetus oli keskimäärin noin 60 % kalliimpaa kuin kokopuupaalien metsäkuljetus.

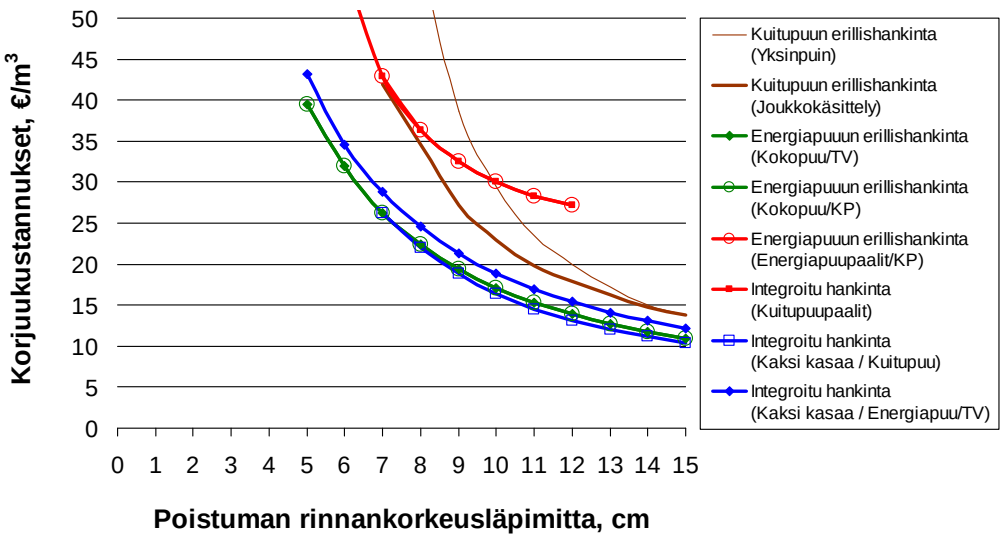
Korkeimmat ensiharvennuspuun korjuukustannukset (sisältäen hakkuu- ja metsäkuljetuskustannukset) olivat kuitupuun erilliskorjuussa, kun käytettiin yksinpuin hakkuuta (kuva 40). Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 10 cm:n puilla kokopuun paalaus -tuotantoketjun korjuukustannukset alittivat ainoastaan kuitupuun erilliskorjuun (yksinpuin hakkuu) kustannukset.

Matalimmat korjuukustannukset olivat kokopuun erilliskorjuussa sekä kuitu- ja energiapuun integroidussa korjuussa. Integroidussa korjuussa kahden kasan menetelmällä hakkuukustannukset jaettiin tasan kuitu- ja energiajakeille. Energiantuotantoon ohjattavien kokopuupaalien korjuukustannukset ylittävät selvästi niin erilliskorjatun kuin integroidustikin korjatun kokopuun korjuukustannukset (kuva 40).

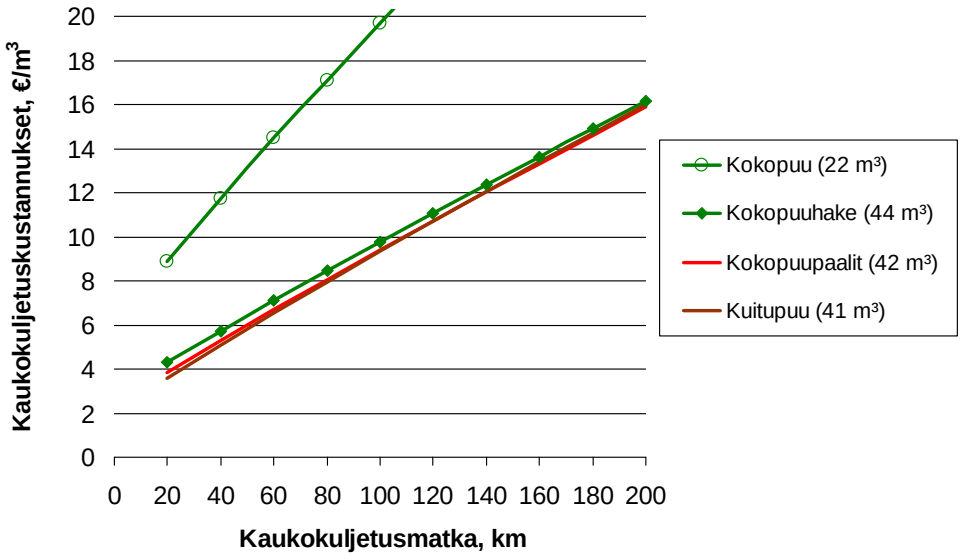
Kuva 41 osoittaa, että mäntykuitupuun ja kokopuupaalien kaukokuljetuskustannukset olivat hyvin lähellä toisiaan. Kokopuuhakkeen kaukokuljetuskustannukset olivat puolestaan hieman korkeammat kuin kuitupuulla ja kokopuupaaleilla. Selvästi kalleinta oli kokopuun kaukokuljetus; sen kustannukset olivat kaksinkertaiset verrattuna muiden jakeiden kaukokuljetuskustannuksiin (kuva 41).



KUVA 39. Metsäkuljetuskustannukset kokopuulla, kuitupuulla ja kokopuupaaleilla metsäkuljetusmatkan suhteen. Kokopuupaaleilla ja kuitupuulla kuormakoko 11,0 m^3 ja kokopuulla 6,5 m^3.



KUVA 40. Kuitu- ja kokopuun erilliskorjuun ja integroidun korjuun kustannukset (sisältäen hakkuu- ja metsäkuljetuskustannukset) korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitan suhteen. Korjuuolot taulukon 2 mukaiset poistuman järeysluokittain, metsäkuljetusmatka 300 m ja kuormakoko kokopuupaaleilla ja kuitupuulla 11,0 m^3 ja kokopuulla 6,5 m^3.



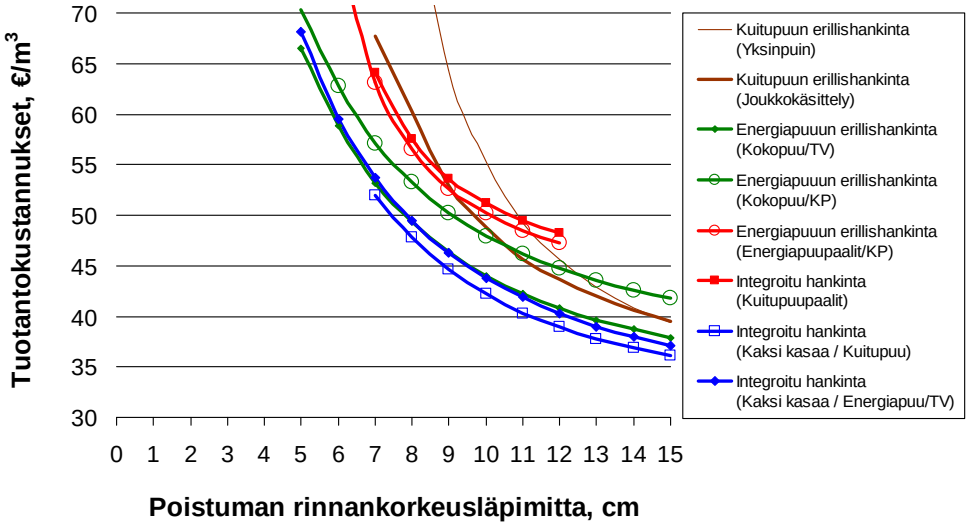
KUVA 41. Kaukokuljetuskustannukset kokopuulla, kokopuuhakkeella, mäntykuitupuulla ja kokopuupaaleilla.

Tuotantokustannukset

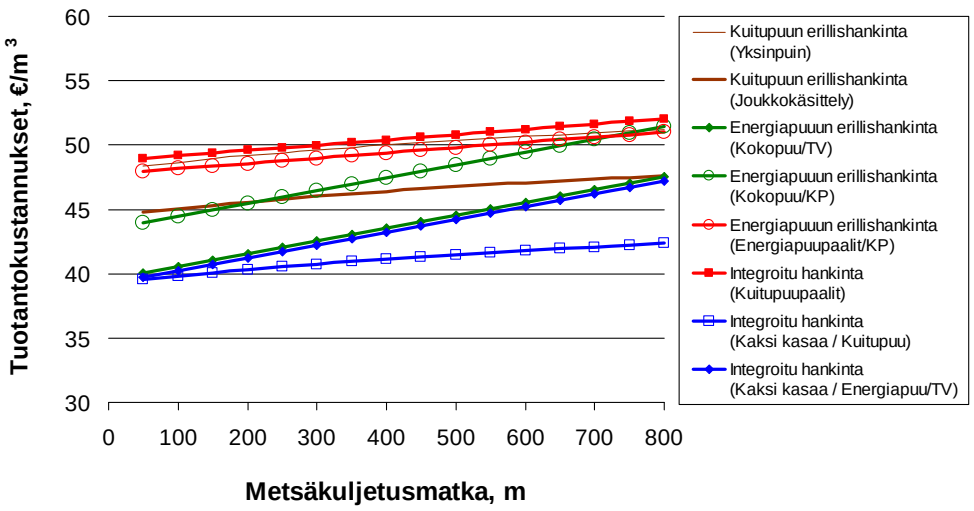
Pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun kokonaistuotantokustannukset sisälsivät kaikki tuotantoketjun kustannustekijät: kantohinta, korjuu-, kaukokuljetus-, terminaali-, kuorinta-, haketus- sekä yleiskustannukset. Korkeimmat ensiharvennuspuun tuotantokustannukset olivat kuitupuun erillishankinnassa, kun hakkuu tehtiin yksinpuin (kuva 42). Kuitupuun erillishankinnan kokonaiskustannukset kyettiin alittamaan kokopuun paalauksella, kun poistuman rinnankorkeusläpimitta oli alle 11 cm.

Matalimmat kuitupuun hankintakustannukset saavutettiin aines- ja energiapuun integroidussa hankinnassa kahden kasan menetelmällä. Integroidussa hankinnassa myös kokopuuhakkeen tuotantokustannukset olivat kilpailukykyiset (kuva 42). Energiapuupaaleista tehdyn polttohakkeen tuotantokustannukset olivat selvästi korkeammat kuin erilliskorjatun tai integroidusti korjatun kokopuuhakkeen tuotantokustannukset (kuva 42).

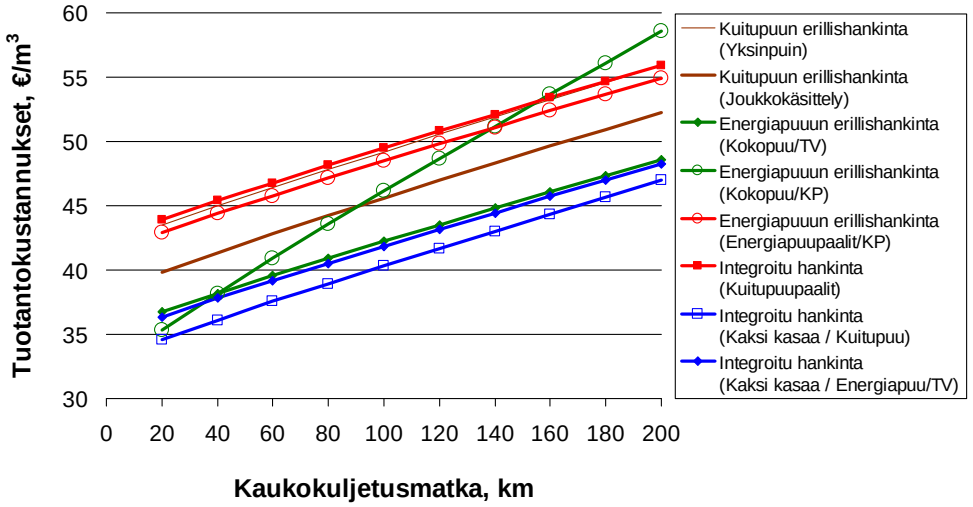
Kuvissa 43 ja 44 on esitetty kuitupuun ja kokopuuhakkeen hankinnan kokonaiskustannukset metsä- ja kaukokuljetusmatkan suhteen. Kuvista nähdään, että kun metsä- ja kaukokuljetusmatkat ovat pitkiä, kokopuun paalaus- tuotantoketjun kustannuskilpailukyky paranee erityisesti verrattuna Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/KP) -tuotantoketjuun.



KUVA 42. Korjattavan puuston järeyden vaikutus kuitu- ja kokopuun erillishankinnan ja integroidun hankinnan kokonaiskustannuksiin. Korjuuolot taulukon 2 mukaiset poistuman järeysluokittain. Metsäkuljetusmatka 300 m, kaukokuljetusmatka 100 km ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset.



KUVA 43. Metsäkuljetusmatkan vaikutus kuitu- ja kokopuun erillishankinnan ja integroidun hankinnan kokonaiskustannuksiin. Korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta 11 cm, kaukokuljetusmatka 100 km ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset.



KUVA 44. Kaukokuljetusmatkan vaikutus kuitu- ja kokopuun erillishankinnan ja integroidun hankinnan kokonaiskustannuksiin. Korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta 11 cm, metsäkuljetusmatka 300 m ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset.

4 TARKASTELU

Aineistot

Tutkimuksessa selvitettiin kattavasti kokopuun paalauksen tuottavuutta ja kustannuksia. Sitä varten kerättiin laajat aineistot: Kokopuupaalien ominaisuuksia selvitettiin kuormainvaaka- ja upotusmittauksin ja paaleja hajotettiin kymmenittäin. Kokopuun paalauksen tuottavuutta tutkittiin lähes 30 aikatutkimuskoealalla, joilta kertyi yli 400 kokopuupaalia. Myös kokopuupaalien metsäkuljetuksen aineistoa voidaan pitää laajana (yli 1 100 paalia). Vain kokopuupaalien ja pitkän kuitupuun kaukokuljetuksen vertailevassa aikatutkimuksessa aineistot jäivät suppeahkoiksi etenkin kuitupuulla (neljä kokopuupaalikuormaa ja yksi kuitupuukuorma).

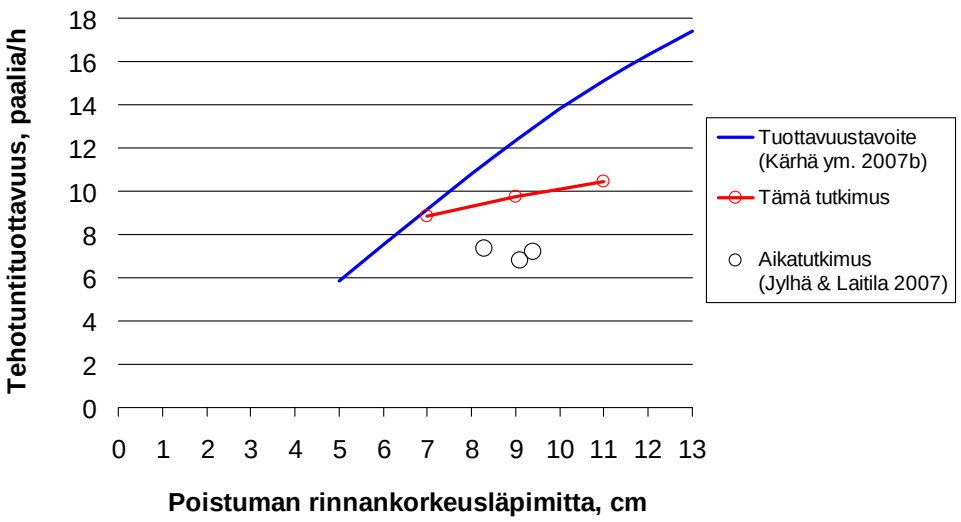
Kokopuupaalien varastointia ja kuivumista ei tässä tutkimuksessa selvitetty. VTT:llä on parhaillaan käynnissä kokopuupaalien ja irtonaisen kokopuun varastointikokeet Keski-Suomessa. Tuloksia niistä on odotettavissa keväällä 2010. Nähtäväksi jää, onko kokopuupaalivarastojen kuivuminen nopeampaa kuin kokopuuvarastojen samoissa varasto-oloissa.

Kokopuun paalaus

Tutkimuksessa Fixteri II -kokopuupaalaimen tehotuntituottavuus oli huomattavasti korkeampi kuin ensimmäisen prototyyppipaalaimen (Fixteri I) (kuva 45). Jylhän ja Laitilan (2007) tutkimuksessa Fixteri I -paalaimen tuottavuus oli kolmen aikatutkimuskoealan aineistossa 2,6–3,7 m^3/tehotunti, kun poistuman keskikoko oli 31–40 dm^3 ja tiheys 1 400–2 850 r/ha. Vastaavissa korjuuoloissa Fixteri II -kokopuupaalaimen tehotuntituottavuus olisi tutkimuksessa laadituilla ajanmenekkimalleilla laskien 4,6–5,1 m^3/h.

Kokopuun paalauksen tuottavuuden huomattavaa paranemista voidaan selittää sillä, että uudella Fixteri-hakkuulaitteella (kuva 6) pystyttiin syöttämään puut hakkuun ja taakan keruun jälkeen suoraan paalaimeen (kuva 3) ilman erillistä välikasausta ja kuormausta (vrt. Jylhä & Laitila 2007). Fixteri I -paalaimen aikatutkimuksessa käytetty hakkuulaite oli Naarva 1500-40E, jossa ei ollut esisyöttötoimintoa.

Tässä tutkimuksessa kuljettaja hyödynsi myös hakkuutyössä joukkokäsittelyä huomattavasti enemmän kuin ensimmäisen prototyypin kuljettaja. Fixteri I:llä keskimääräinen taakkakoko oli 1,09–1,56 r/taakka ja joukkokäsittelynä hakattujen puiden osuus oli 8–36 % kaikista hakatuista puista (Jylhä & Laitila 2007). Vastaavasti Fixteri II:n aikatutkimuksessa joukkokäsittelyprosentti oli keskimäärin 80 % ja keskimääräinen taakkakoko oli 2,9 r/taakka (koealoittainen minimi 1,6 ja maksimi 4,3 r/taakka); tyypillisesti taakkakoko oli kolme puuta (vrt. kuva 17, s. 30).



KUVA 45. Kokopuun paalauksen tuottavuudet tässä (taulukon 2 mukainen paalin koko) ja Jylhän ja Laitilan (2007) tutkimuksessa sekä Kärhän ym. (2007b) määrittelemä kilpailukykyinen tuottavuustaso (paalin koko 0,5 m^3).

Fixteri I:n aikatutkimuksessa samanaikaisesti tehtyjen työvaiheiden osuus oli keskimäärin 26 % tehotyöajasta: sahauksen ja syötön osuus oli keskimäärin 11 %, hakkuun ja paalauksen 14 % ja työpistesiirtymisten aikaisen paalauksen 0,5 % tehotyöajasta. Uudemmalla paalaimella työvaiheita pystyttiin limittämään entistä enemmän alustakoneen suuremman hydraulikapasiteetin ja paalaimeen tehtyjen teknisten parannusten (mm. lisähydrauliikkapumppu paalaimelle) ansiosta.

Tässä tutkimuksessa samanaikaisen paalauksen ja hakkuun osuus oli keskimäärin 21 % tehotyöajasta ja hakkuun ja katkonnan 13 %. Työpistesiirtymisten aikaisen paalauksen osuus oli puolestaan 2 %. Eri työvaiheita on pystyttävä limittämään toisiinsa entistä tehokkaammin pyrittäessä edelleen tehostamaan kokopuun paalausta. Kärhän ym. (2004) hakkuutähteiden paalauksen aikatutkimuksessa samanaikaisten työvaiheiden osuus oli keskimäärin yli 60 % tehotyöajasta.

Fixteri II -kokopuupaalaimen tuottavuusfunktiot perustuvat työtapaan, jossa työmaalla tuotetaan vain yhtä paalilajia. Aikatutkimuksessa puut prosessoitiin joko kuitu- tai energiapuupaaleiksi, joten puiden lajittelua ei tarvittu. Lisäksi tutkimukset tehtiin leimikoissa, jotka olivat ”puhtaita” tai lähes ”puhtaita” männiköitä ja joissa metsänhoitotyöt oli tehty ajallaan, eikä alikasvosta tarvinnut raivata hakkuutyön ohessa.

Kahden tai useamman paalilajin työtavassa kokopuun paalauksen tuottavuus pienenee, koska paalaimeen syötettäviä puita joudutaan lajittelemaan sekä puulajin että puiden käyttötarkoituksen mukaan. Fixteri I:n aikatutkimuksessa kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus oli kuitupuupaalien teossa 3,7 m^3/h (Jylhä & Laitila 2007). Kun em. tutkimuksessa otettiin huomioon alikasvoksen ja kuitupuupaaleihin kelpaamattoman puuaineksen raivausaika, kokopuun paalauksen tehotuntituottavuus laski 3,1 m^3:iin/h.

Jylhän ja Laitilan (2007) tutkimuksessa tarkasteltiin myös työtapaa, jossa koealalta tehtiin sekä energia- että kuitupuupaaleja. Lehtipuista ja alamittaisista havupuista tehtiin energiapuupaaleja ja suuremmista havupuurungoista kuitupuupaaleja. Tällä koealalla kokopuun paalauksen tuottavuus oli 2,8 m^3/tehotunti. Puustoltaan se oli samankaltainen kuin koeala, jolla yhden paalilajin työmenetelmällä saavutettiin 3,7 ja 3,1 m^3:n tehotuntituottavuudet (Jylhä & Laitila 2007). Siten puiden lajittelu alensi tuottavuutta jopa neljänneksellä.

Kokopuupaalien metsä- ja kaukokuljetus

Kokopuiden paalaus suurentaa taakkakokoa kuormaus- ja purkutyössä sekä kasvattaa kuormakokoa metsäkuljetuksessa. Taakkakoon vaikutus metsäkuljetuksen tuottavuuteen on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa (esim. Gullberg 1997, Väätäinen ym. 2005, Nurminen ym. 2006, Laitila ym. 2007).

Taakka- ja kasakoon merkitys on suuri erityisesti harvennuksilla, joilla hakkuukertymä on alhainen ja puut ovat hakkuun jäljiltä hajallaan pieninä kourakasoina ajouran varrella (Nurminen ym. 2006). Pitkillä metsäkuljetusmatkoilla kokopuun paalauksen edut tulevat esille kuormakoon kasvun kautta, erityisesti kun paalien metsäkuljetuksen tuottavuutta verrataan irtonaisen kokopuun metsäkuljetukseen (Laitila ym. 2009).

Kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormausta ja purkua hidasti pieni taakkakoko (paalit olivat lyhyitä) pitkään kuitupuuhun verrattuna, vaikka kuormakoko olikin likimain sama. Pitkällä kuitupuulla vetoautoon mahtuu yksi puunippu ja perävanuun kaksi nippua. Kokopuupaaleilla vetoautoon on kuormattava kaksi paalinippua ja vetoautoon kolme, jotta saavutetaan likimain sama kuormakoko kuin pitkällä kuitupuulla (Laitila ym. 2009). Viiden paalinipun sitomiseen ja kuormaliinojen avaamiseen menee puolestaan enemmän aikaa kuin kolmen kuitupuunipun sitomiseen ja liinojen avaamiseen. Lisäksi kokopuupaaleilla kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen on varattava huomattavasti enemmän aikaa kuin karsitulla kuitupuulla.

Tuotantoketjujen vertailulaskelmat

Tutkimuksessa laskettiin kokopuun paalaukseen perustuvan tuotantoketjun kustannukset ja niitä verrattiin vaihtoehtoisten ketjujen kustannuksiin pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun hankinnassa. Tarkastelussa olivat hakkuu-, metsäkuljetus-, korjuu-, kaukokuljetus- sekä kokonaistuotantokustannukset. Kokonaistuotantokustannukset sisälsivät kaikki ne kustannustekijät, mitkä syntyvät, kun energiapuuta hankitaan polttoon tai selluhaketta tuotetaan kuiduttavalle teollisuudelle.

Tehdyt vertailulaskelmat osoittivat, että kokopuun paalaus -tuotantoketju on sitä kilpailukykyisempi, mitä pienirunkoisempaa korjattava ensiharvennuskuitupuu on. Poistuman rinnankorkeusläpimitan ollessa 10–11 cm kuitupuun hankinnan kokonaiskustannukset olivat kokopuun paalaukseen perus-

tuvalla tuotantoketjulla samalla tasolla ”perinteisen” yksinpuin hakkuuseen perustuvan kuitupuun erillishankinnan kanssa. Joukkokäsittely ja suurempi hakkuukertymä ovat kokopuukorjuun vahvuuksia yksinpuin tehtävään kuitupuun erilliskorjuuseen verrattuna. Tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että kokopuun paalaus soveltuu parhaiten sellaisiin ensiharvennusleimikoihin, joissa hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta on 7–10 cm (vrt. Kärhä ym. 2007b).

Kokopuun paalaus on kilpailukykyisimmillään kuitu- ja energiapuun yhdistetyssä hankinnassa. Pelkän energiapuun hankinnassa sen kilpailukyky on heikko (vrt. kuvat 42–44) (vrt. Kärhä ym. 2007b).

Tutkimuksessa kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky parani, kun metsä- ja kaukokuljetusmatkat pitenivät (kuvat 43 ja 44). Tutkimuksessa kaukokuljetuskustannukset laskettiin autokuljetuksena. Pitkillä kaukokuljetusmatkoilla luonnollisesti myös juna- ja aluskuljetukset ovat mahdollisia (esim. Hänninen 2007, Karttunen ym. 2008).

Tarkasteltaessa laadittuja kustannuslaskelmia on muistettava, että niiden pohjalla olivat tässä tutkimuksessa mitatut tuottavuustasot ja käytettyjen koneyksiköiden kustannustasot (kuva 42). Kokopuun paalauksesta tulee kilpailukykyinen vaihtoehto, mikäli tuottavuus kyetään nostamaan Kärhän ym. (2007b) esittämälle tasolle tai kokopuupaalaimen hankintahintaa pystytään olennaisesti alentamaan.

Tutkimuksessa kokopuupaalaimen käyttötuntikustannukseksi saatiin 107 €, kun koneyhdistelmän hankintahinnaksi oletettiin 550 000 € (alv. 0 %). Mikäli hankintahinta olisi 450 000 € (alv. 0 %), käyttötuntikustannukset jäisivät vajaaseen 100 euroon. Jos hankintahinta olisi epärealistisena pidettävä 350 000 € (alv. 0 %), käyttötuntikustannukset olisivat hieman yli 90 €/h.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Fixteri II -paalaimella pystyttiin tehostamaan huomattavasti kokopuun paalauksen tuottavuutta ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna. Aikaansaatu tuottavuushyppy ei kuitenkaan riitä takaamaan kokopuun paalauksen kilpailukykyä pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun korjuussa. – Tarvitaan vielä toinen, vastaavansuuruinen tuottavuuden parantuminen kuin mitä tässä T&K-konsortiossa saavutettiin.

Yksi mahdollisuus parantaa kokopuun paalauksen tuottavuutta on nosturin liikkeiden automatisointi. Tehtävä on haasteellinen, mutta se saattaa olla lähes ainoa keino saavuttaa selvästi nykyistä korkeampi samanaikaisten työvaiheen osuus kokopuun paalaustyössä. Korkeampaan tuottavuutta tavoiteltaessa koneyksikön hankintakustannukset on kuitenkin pidettävä kurissa; hankintahinta ei saa muodostua rasitteeksi, jos tuottavuutta saadaan parannettua. Liikkeiden automatisointia tai puoliautomatisointia helpottaisi, jos paalaimen syöttöaukko olisi koneen edessä. Ajouran suuntaiseen syöttöaukkoon olisi helpompi syöttää puuta ja samalla riski jäävän puuston vaurioitumisesta syöttötyövaiheen aikana pienenisi merkittävästi.

Vaikka kokopuun paalauksen kustannuskilpailukyky näyttää suhteellisen heikolta verrattuna esimerkiksi aines- ja energiapuun integroituun hankintaan kahden kasan menetelmällä, uudet puunkäyttäjät (esim. biojalostamot) saattavat luoda uusia mahdollisuuksia kokopuun paalaukseen perustuvalle tuotantoketjulle. Tämän vuoksi on ensiarvoisen tärkeää, että pieniläpimittaisen ensiharvennuspuun korjuun kehitystyöhön panostetaan monella rintamalla; yksi mielenkiintoinen kehityslinja nyt ja tulevaisuudessa on kokopuun paalaus.

LÄHDELUETTELO

Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Tiedonantoja 131.

Bergkvist, I. 2003. Multitree-handling increases both productivity and profitability in smallwood thinnings. Skogforsk, Results 3/2003. Saatavissa: http://www.skogforsk.org/upload/Dokument/Results/2003-03.pdf.

Euroopan parlamentin ja neuvoston päätös jäsenvaltioiden pyrkimyksistä vähentää kasvihuonepäästöjään osana yhteisön kasvihuonekaasupäästöjen vähentämissitoumusten täyttämistä vuoteen 2020 mennessä. 2008a. Euroopan yhteisöjen komissio, KOM(2008) 17. Saatavissa: http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0017:FIN:FI:PDF.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä. 2008b. Euroopan yhteisöjen komissio, KOM(2008) 19. Saatavissa: http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0019:FIN:FI:PDF.

Gislerud, O. 1974. Heltreutnyttelse. II. Biomasse og biomasseegenskaper hos tynningsvirke av gran, furu, bjørk og or. Norsk Institutt for skogforskning, Rapport 6: 1–59.

Gullberg, T. 1997. A deductive time consumption model for loading shortwood. International Journal of Forest Engineering 8(1): 35–44.

Hakkila, P. & Kalaja, H. 1993. Ketjukarsinta ensiharvennusmännikön korjuuratkaisuna. Folia Forestalia 803.

Hakkila, P., Rieppo, K. & Kalaja, H. 1998. Ensiharvennuspuun erilliskäsittely tehdasvarastolla: Ketjukarsintaan ja pienrumpukuorintaan perustuva menetelmä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 700.

Hänninen, M. 2007. Karsimattoman aines- ja metsäenergiapuun kuljetuslogistiikan kehittäminen. Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne, Logistiikan koulutusohjelma, Opinnäytetyö.

Juntunen, M-L. & Herrala-Ylinen, H. (toim.). 2008. Metsien hoito. Julkaisussa: Peltola, A. (toim.). Metsätilastollinen vuosikirja 2008. Metsäntutkimuslaitos. SVT, Maa-, metsä- ja kalatalous 2008: 113–160.

Juntunen, M-L. & Herrala-Ylinen, H. 2009. Metsänhoito- ja perusparannustyöt 2008. Metsäntutkimuslaitos, Metsätilastotiedote 24/2009.

Jylhä, P. & Keskinen, N. 2006. Properties of bundled tree sections of young Scots pine in debarking, chipping, and pulping. Forest Products Journal 56(7/8): 39–45.

Jylhä, P. & Laitila, J. 2007. Energy Wood and Pulpwood Harvesting from Young Stands Using a Prototype Whole-tree Bundler. Silva Fennica 41(4): 763–779. Saatavissa: http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf41/sf414763.pdf.

Kansallinen metsäohjelma 2010. 1999. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 2/1999. Saatavissa: http://wwwb.mmm.fi/kmo/asiakirjat_raportit/Kansallinen_metsaohjelma.pdf.

Kariniemi, A. 2009. Puunkorjuu ja puutavaran kaukokuljetus vuonna 2008. Metsätehon katsaus 39. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_39.pdf.

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. & Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Energia- ja ympäristötekniikan osasto, Tutkimusraportti EN B-177. Saatavissa: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/ClimBus/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/Projektiaineistot/2008/Loppuraportti.pdf.

Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. & Pitkänen, J. 2007. Suomen metsävarat metsäkeskuksittain 2004–2006 ja metsävarojen kehitys 1996–2006. Metsätieteen aikakauskirja 2B/2007: 149–213. Saatavissa: http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff07/ff072149.pdf.

Kärhä, K. (toim.). 2001. Harvennuspuun koneelliset korjuuvaihtoehdot. HARKO-projektin (1999-2001) loppuraportti. Työtehoseuran julkaisuja 382.

Kärhä, K. 2006. Whole-tree harvesting in young stands in Finland. Forestry Studies 45: 118–134. Saatavissa: http://mi.emu.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=262022/Mets_45_12_Karha.pdf.

Kärhä, K. 2007a. Towards More Cost-Efficient Harvesting of Energy Wood and Pulpwood in Early Thinnings. Julkaisussa: Savolainen, M. (toim.) Book of Proceedings. BIOENERGY 2007, 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition, 3rd–6th September 2007, Jyväskylä Paviljonki, Finland. Finbio Publications 36: 443–451.

Kärhä, K. 2007b. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. Metsätehon katsaus 28. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_28.pdf.

Kärhä, K. 2007c. Ensiharvennusten korjuuolot vuosina 2000–2005. Metsätehon tuloskalvosarja 17/2007. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Tuloskalvosarja_2007_%2017_ensiharvennusten%20korjuuolot_kk.pdf.

Kärhä, K. 2008. Integration of small-diameter wood harvesting in early thinnings using the two-pile cutting method. Julkaisussa: World Bioenergy 2008, Proceedings of Poster Session. World Bioenergy 2008 Conference & Exhibition on Biomass for Energy, 27th–29th May 2008, Jönköping, Sweden. s. 124–128.

Kärhä, K. & Vartiamäki, T. 2006. Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions. Biomass and Bioenergy 30(12): 1043–1052.

Kärhä, K. & Mutikainen, A. 2008. Moipu 400ES ensiharvennuspuun integroidussa hakkuussa. TTS tutkimuksen tiedote, Luonnonvara-ala: Metsä 10/2008 (726).

Kärhä, K., Vartiamäki, T., Liikkanen, R., Keskinen, S. & Lindroos, J. 2004. Hakkuutähteen paalauksen ja paalien metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset. Metsätehon raportti 179. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/4djb1xxw0otzss5.pdf.

Kärhä, K., Keskinen, S., Kallio, T., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006a. Ennakkoraivaus osana ensiharvennuspuun korjuuta. Metsätehon raportti 187. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/rvjdj8nborun8p.pdf.

Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006b. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. Metsätehon raportti 193. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Raportti_193_KK_ym.pdf.

Kärhä, K., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007a. Aines- ja energiapuun integroitu hankinta. Julkaisussa: Kariniemi, A. (toim.). Kehittyvä puuhuolto 2007 -seminaari metsäammattilaisille, 14.–15.2.2007, Paviljonki, Jyväskylä. Seminaarijulkaisu: 67–74. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Kehittyva_puuhuolto_2007_Karha_Laitila_Jylha.pdf.

Kärhä, K., Keskinen, S., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007b. Aines- ja energiapuun hankintaketjujen kannattavuusvertailu. Metsätehon tuloskalvosarja 2/2007. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Tuloskalvosarja_2007_2_Kokopuupaalain_kk.pdf.

Kärhä, K., Högnäs, T., Kumpare, T., Kovettu, A. & Mutikainen, A. 2009. Ponsse H53e ensiharvennusmännikön integroidussa hakkuussa. Metsätehon tuloskalvosarja 5/2009. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Tuloskalvosarja_2009_05_Ponsse%20H53e_kk.pdf.

Kärkkäinen, M. 1976. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. Silva Fennica 10(3): 212–236.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108.

Laitila, J. 2008. Harvesting Technology and the Cost of Fuel Chips from Early Thinnings in Finland. Silva Fennica 42(2): 267–283. Saatavissa: http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf42/sf422267.pdf.

Laitila, J., Asikainen, A. & Nuutinen, Y. 2007. Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings. International Journal of Forest Engineering 18(2): 29–39.

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(1): 105–114.

Lilleberg, R. 1994. Joukkokäsittelyharvesteri FMG 990/756 H ensiharvennusmänniköss ä. Metsätehon katsaus 8/1994.

Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time Consumption Analysis of the Mechanized Cut-to-lenght Harvesting System. Silva Fennica 40(2): 335–363. Saatavissa: http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf40/sf402335.pdf.

Oikari, M., Kärhä, K., Palander, T., Pajuoja, H. & Ovaskainen, H. 2008. Puunkorjuun tehostaminen nuorista metsistä. Metsätehon katsaus 36. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Katsaus_36_1.pdf.

Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008. 2008. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja, Energia ja ilmasto 36/2008. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/21079/TEMjul_36_2008_energia_ja_ilmasto.pdf.

Repola, J., Ojansuu, R. & Kukkola, M. 2007. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 53. Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp053.pdf.

Seppänen, V., Ahonen, M. & Nikala, L. 1998. Massahake-menetelmän soveltaminen koivulle sekä hirteen raaka-ainetuotantoon. Julkaisussa: Nikku, P. (toim.). Projektikirja 1993–1998, Osa I, Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelma, Julkaisuja 21: 313–319.

Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. & Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. Metlan työraportteja 48. Saatavissa: http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp048.pdf.

Ylitalo, E. 2009. Puun energiakäyttö 2008. Metsäntutkimuslaitos, Metsätilastotiedote 15/2009.

Suulliset tiedonannot

Jari Lindblad, Metsäntutkimuslaitos, 5.10.2009.

Hankkeessa tuotetut julkaisut (2/2007 – 12/2009).

VUOSI 2007:

Jylhä, P. & Laitila, J. 2007. Energy Wood and Pulpwood Harvesting from Young Stands Using a Prototype Whole-tree Bundler. Silva Fennica 41(4): 763–779. Saatavissa: http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf41/sf414763.pdf.

Jylhä, P. & Laitila, J. 2007. Energia- ja ainespuun korjuu nuorista metsistä kokopuupaalaimella. Metsätieteen aikakauskirja 4/2007: 402–403. Saatavissa: http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff07/ff074401.pdf.

Jylhä, P., Laitila, J. & Kärhä, K. 2007. Integrated Harvesting of Pulpwood and Energy Wood from First Thinnings Using the Bundling Method. In: Savolainen, M. (Ed.). Book of Proceedings. BIOENERGY 2007, 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition, 3rd – 6th September 2007, Jyväskylä Paviljonki, Finland. Finbio Publications 36: 359–363.

Jylhä, P., Laitila, J., Kärhä, K. & Björheden, R. 2007. Klenvirkesbuntare – framtidsmaskin i förstagallring? Summary: The bundle harvester – a future solution for first thinnings? Skogforsk, Resultat 19/2007.

Kärhä, K., Keskinen, S., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Aines- ja energiapuun hankintaketjujen kannattavuusvertailu. Metsätehon tuloskalvosarja 2/2007. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Tuloskalvosarja_2007_2_Kokopuupaalain_kk.pdf.

Kärhä, K., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Aines- ja energiapuun integroitu hankinta. Julkaisussa: Kariniemi, A. (toim.). Kehittyvä puuhuolto 2007 -seminaari metsäammattilaisille, 14.–15.2.2007, Paviljonki, Jyväskylä. Seminaarijulkaisu: 67–74. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/uploads/Kehittyva_puuhuolto_2007_Karha_Laitila_Jylha.pdf.

Kärhä, K., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Integrated Procurement of Pulpwood and Energy Wood in Early Thinnings with Bundling. In: Abstracts of Workshop. IEA Bioenergy Task 31, International Workshop "Sustainable forestry systems for bioenergy: integration, innovation and information", 29 August – 3 September 2007, Joensuu, Finland. 1 p.

Kärhä, K., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Lisää energiapuuta ensiharvennuksilta. BioEnergia 1/2007: 20–22.

Kärhä, K., Laitila, J. & Jylhä, P. 2007. Kokopuun paalaus haastaa aines- ja energiapuun erillishankinnan. KoneYrittäjä 1/2007: 18–20.

VUOSI 2008:

Jylhä, P., Kärhä, K., Keskinen, N. & Laitila, J. 2008. Feasibility of Whole-Tree Bundling System for Integrated Procurement of Energy Wood and Pulpwood. In: Abstracts of Presentation. IUFRO ALL-D3-Conference ”Pathways to Environmentally Sound Technologies for Natural Resource Use”, June 15-20, 2008, Sapporo, Japan. p. 11.

Jylhä, P., Kärhä, K. & Laitila, J. 2008. Integrated procurement of pulpwood and energy wood by whole-tree bundling. In: World Bioenergy 2008, Proceedings of Poster Session. World Bioenergy 2008 Conference & Exhibition on Biomass for Energy, 27th–29th May 2008, Jönköping, Sweden. pp. 78–81.

Kärhä, K., Jylhä, P. & Laitila, J. 2008. A Novel Technology for the Integrated Harvesting of Small-Sized Wood in Early Thinnings. In: Abstracts of Poster presentations, Proceedings CD-ROM. World Sustainable Energy Days, 5.3.-7.3.2008, Wels, Austria. 1 p.

Kärhä, K., Jylhä, P., Laitila, J. & Pajuoja, H. 2008. Competitiveness of Whole-Tree Bundling in Early Thinnings. In: Bergseng, E., Delbeck, G. & Hoen, H.F. (Eds.). Proceedings of the Biennial Meeting of the Scandinavian Society of Forest Economics, Lom, Norway, 6th–9th April, 2008. Scandinavian Forest Economics 42: 173–182. Saatavissa: http://www.metla.fi/org/ssfe/publications/proceedings_endelig.pdf.

Kärhä, K., Jylhä, P., Laitila, J. & Pajuoja, H. 2008. Whole-Tree Bundling: A New Concept for Integrated Pulpwood and Energy Wood Procurement from Early Thinnings. In: Suadicani, K. & Talbot, B. (Eds.). The Nordic-Baltic Conference on Forest Operations – Copenhagen, September 23-25, 2008. Forest & Landscape Working Papers 30/2008: 7–8. Saatavissa: http://www.sl.kvl.dk/upload/workingpapersno30.pdf.

VUOSI 2009:

Dahl, O., Jylhä, P., Laitila, J. & Kärhä, K. 2009. Effect of raw wood supply system on the wood paying capability of a kraft pulp mill using Scots pine. In: Savolainen, M. (Ed.). Book of Proceedings, Part I. BIOENERGY 2009 - Sustainable Bioenergy Business, 4th International Bioenergy Conference, 31st August - 4th September 2009, Jyväskylä Paviljonki, Finland. Finbio Publications 44: 371–379.

Jylhä, P., Dahl, O., Laitila, J. & Kärhä, K. 2009. Competitiveness of the supply chains of small-diameter wood based on the wood paying capability of a kraft pulp mill. In: Abstracts of Workshop. IEA Bioenergy Task 31, International Workshop “Forests Under Pressure?! Bioenergy – Forest Industry – The Public”, 5.-7.10.2009, Wershofen, Germany. 2 p.

Kärhä, K. 2009. Hankinnan haasteita ja ratkaisuja. Julkaisussa: Savolainen, M. (toim.). Kevätpäivä 2009 -aineisto. Finbion julkaisuja 43: 43–49.

Kärhä, K., Jylhä, P. & Laitila, J. 2009. The Fixteri – A Novel Machine Concept for Integrated Pulpwood and Energy Wood Harvesting in Early Thinnings. In: Prknová, H. (Ed.). Proceedings. FORMEC 2009 – 42. International Symposium on Forestry Mechanization, 21st – 24th June, 2009, Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic. pp. 220–228. Saatavissa: http://www.formec2009.org/images/clanek/karha4.pdf.

Laitila, J., Jylhä, P. & Kärhä, K. 2009. Productivity of the supply system based on whole-tree bundling. In: Savolainen, M. (Ed.). Book of Proceedings, Part I. BIOENERGY 2009 - Sustainable Bioenergy Business, 4th International Bioenergy Conference, 31st August - 4th September 2009, Jyväskylä Paviljonki, Finland. Finbio Publications 44: 433–437.

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(1): 105–114.

Raitila, J., Kärhä, K., Jylhä, P. & Laitila, J. 2009. New harvesting technology in forest fuel procurement. In: Savolainen, M. (Ed.). Book of Proceedings, Part I. BIOENERGY 2009 - Sustainable Bioenergy Business, 4th International Bioenergy Conference, 31st August - 4th September 2009, Jyväskylä Paviljonki, Finland. Finbio Publications 44: 399–405.

LIITE 2

Kokopuun paalauksen aikatutkimusaineiston koko koealoittain sekä aikatutkimuskoealoittaiset poistuman keskitunnukset ja paalien ominaisuustiedot.

Aikatutkimusaineisto, syksy 2009

		Paalit,	Paalien	Paalin	Kuormain-	Upotus-	Paalien		Hakkuupoistuman väh. 40 mm puut			
Koeal	Tila	kpl	kost., %	tuorem., kg	vaakapuna	mittaus	hajotus	L-suhde, °	Keskilpm.,	Keskipit., m	Runkotil., dm3	Kokopuutil., dm3
1	Teerik.	22	53%	448	kyllä	ei	ei	44	8	10.3	32	38
2	Teerik.	14	54%	437	kyllä	ei	ei	45	7	9.0	19	22
3	Teerik.	17	56%	374	kyllä	ei	ei	46	7	8.9	22	26
4	Teerik.	12	54%	330	kyllä	ei	ei	48	6	8.0	15	18
5	Teerik.	13	53%	442	kyllä	ei	ei	47	7	8.7	20	23
6	Teerik.	13		419	kyllä	kyllä	kyllä	40	9	10.2	43	52
7	Teerik.	17		396	kyllä	kyllä	kyllä	37	9	10.6	53	62
8	Teerik.	18	54%	442	kyllä	ei	ei	45	8	9.7	29	34
9	Teerik.	15	57%	419	kyllä	ei	ei	48	7	8.7	22	27
10	Teerik.	22		359	kyllä	kyllä	kyllä	42	7	9.1	24	29
11	Teerik.	19	57%	535	kyllä	ei	ei	45	8	10.0	28	33
12	Teerik.	17	56%	470	kyllä	ei	ei	39	7	9.9	27	32
13	Teerik.	13		498	kyllä	kyllä	kyllä	41	9	10.0	41	49
14	Pyyvi	5	57%	502	kyllä	ei	ei	55	8	8.3	27	35
15	Pyyvi	7		483	kyllä	kyllä	ei	51	8	8.0	23	30
16	Pyyvi	9		448	kyllä	kyllä	kyllä	51	8	8.9	30	38
17	Pyyvi	7	56%	563	kyllä	ei	ei	56	8	8.1	25	31
18	Pyyvi	12	56%	539	kyllä	ei	ei	52	11	11.3	63	77
19	Pyyvi	14		559	kyllä	kyllä	kyllä	44	9	10.6	41	50
20	Pyyvi	17		555	kyllä	kyllä	kyllä	41	9	11.3	47	56
21	Pyyvi	12	58%	611	kyllä	ei	ei	48	9	10.0	35	41
22	Pyyvi	10		454	kyllä	ei	ei	55	9	7.8	31	42
23	Pyyvi	9	58%	392	kyllä	ei	ei	52	6	7.1	15	19
24	Pyyvi	20		500	kyllä	ei	ei	39	11	11.0	63	76
25	Pyyvi	20		535	kyllä	ei	ei	40	10	10.8	55	65
26	Pyyvi	18	55%	581	kyllä	ei	ei	49	9	10.4	41	49
27	Pyyvi	15	54%	488	kyllä	ei	ei	46	9	8.9	34	43
28	Pyyvi	22	54%	562	kyllä	ei	ei	45	10	10.8	56	67

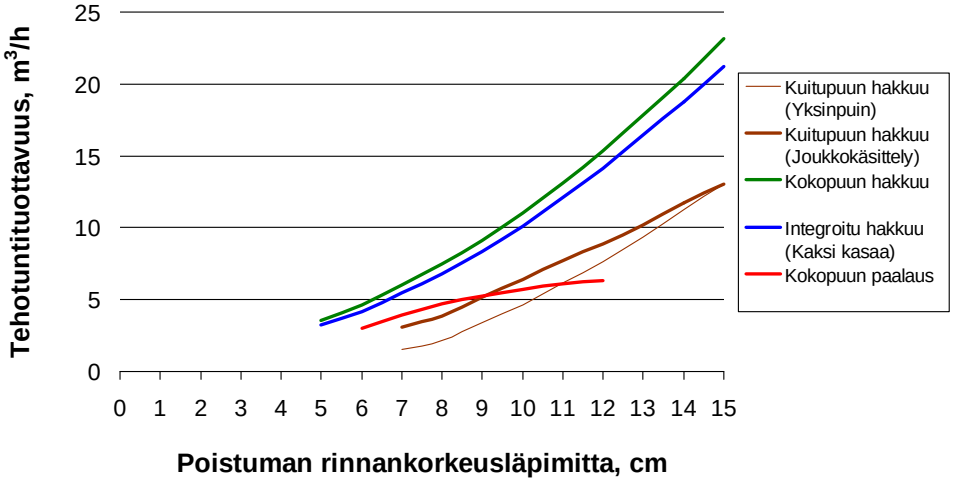
Upotusmittauskokeilu, syksy 2008

		Paaleja	Paalien	Paalin	Kuormain-	Upotus-	Paalien		Hakkuupoistuman väh. 10 mm puut			
Koeal	Tila	kpl	kost., %	tuorem., kg	vaakapuna	mittaus	hajotus	L-suhde, °	Keskilpm.,	Keskipit., m	Runkotil., dm3	Kokopuutil., dm3
101	Teerik.				ei	kyllä	kyllä	51	6	7.4		18
102	Pyyvi				ei	kyllä	kyllä	55	8	7.1		34
103	Pyyvi				ei	kyllä	kyllä	41	12	13.6		103

"Kahden kasan kokeilu", syksy 2009

		Paaleja	Paalien	Paalin	Kuormain-	Upotus-	Paalien		Hakkuupoistuman väh. 40 mm puut			
Koeal	Tila	kpl	kost., %	tuorem., kg	vaakapuna	mittaus	hajotus	L-suhde, °	Keskilpm.,	Keskipit., m	Runkotil., dm3	Kokopuutil., dm3
29	Pyyvi	9	58%	477	kyllä	ei	ei	48	14	15.1	132	155

Tutkimuksessa käytetyt kuitupuun ja kokopuun hakkuun tuottavuusmallit erillishakkuussa sekä käytetty integroidun hakkuun tuottavuusmalli. Kuvaan merkitty myös tässä tutkimuksessa raportoitu kokopuun paalauksen tuottavuuskäyrä.



Lähteet:

- Kuitupuun hakkuu (Yksinpuin): Kärhä ym. (2006a).
- Kuitupuun hakkuu (Joukkokäsittely): Lilleberg (1994), Bergkvist (2003), Kärhä ym. (2006a), Kärhä ym. (2009).
- Kokopuun hakkuu: Kärhä & Mutikainen (2008), Kärhä ym. (2006b), Kärhä ym. (2009).
- Integroitu hakkuu (Kaksi kasaa): Kärhä & Mutikainen (2008), Kärhä ym. (2006b), Kärhä ym. (2009).

LIITE 4

Tuotantoketjujen kokonaistuotantokustannukset (ks. kuva 42).
Korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta 7 cm (taulukko 2), metsäkuljetusmatka 300 m, kaukokuljetusmatka 100 km ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset (ks. kuva 42).

Kustannustekijä	Kuitupuun erillishankinta (Yksinpuin)	Kuitupuun erillishankinta (Joukkokäsittely)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/TV)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/KP)	Energiapuun erillishankinta (Energiapuupaalit/KP)	Integroitu hankinta (Kuitupuupaalit)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Kuitupuu)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Energiapuu/TV)
	€/m^3							
Kantohinta	11,0	11,0	6,0	6,0	6,0	6,0	11,0	4,0
Hakkuu	72,9	36,4	18,8	18,8	39,5	39,5	20,7	20,7
Metsäkuljetus	5,5	5,5	7,5	7,5	3,5	3,5	5,9	8,1
TV-haketus	-	-	8,0	-	-	-	-	8,0
Kaukokuljetus	9,3	9,3	9,8	19,7	9,4	9,4	9,3	9,8
KP-murskaus	-	-	-	2,0	1,6	-	-	-
Terminaali	1,0	1,0	-	-	-	1,0	1,0	-
Kuorinta	0,4	0,5	-	-	-	0,8	0,5	-
Haketus selluhakkeeksi	0,8	0,8	-	-	-	0,8	0,8	-
Yleiskustannukset	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
YHTEENSÄ	**104,1**	**67,7**	**53,2**	**57,1**	**63,1**	**64,1**	**51,9**	**53,7**
	€/MWh *							
	52,0	**33,8**	**26,6**	**28,6**	**31,5**	**32,0**	**26,0**	**26,9**

*) Oletettu, että puun energiasisältö 2,0 MWh/m^3.

LIITE 5

Tuotantoketjujen kokonaistuotantokustannukset (ks. kuva 42).
Korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta 9 cm (taulukko 2), metsäkuljetusmatka 300 m, kaukokuljetusmatka 100 km ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset (ks. kuva 42).

Kustannustekijä	Kuitupuun erillishankinta (Yksinpuin)	Kuitupuun erillishankinta (Joukkokäsittely)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/TV)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/KP)	Energiapuun erillishankinta (Energiapuupaalit/KP)	Integroitu hankinta (Kuitupuupaalit)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Kuitupuu)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Energiapuu/TV)
	€/m^3							
Kantohinta	11,0	11,0	6,0	6,0	6,0	6,0	11,0	4,0
Hakkuu	33,3	21,8	12,4	12,4	29,6	29,6	13,5	13,5
Metsäkuljetus	5,3	5,3	7,1	7,1	2,9	2,9	5,3	7,8
TV-haketus	-	-	8,0	-	-	-	-	8,0
Kaukokuljetus	9,3	9,3	9,8	19,7	9,4	9,4	9,3	9,8
KP-murskaus	-	-	-	2,0	1,6	-	-	-
Terminaali	1,0	1,0	-	-	-	1,0	1,0	-
Kuorinta	0,4	0,5	-	-	-	0,8	0,5	-
Haketus selluhakkeeksi	0,8	0,8	-	-	-	0,8	0,8	-
Yleiskustannukset	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
YHTEENSÄ	**64,3**	**52,9**	**46,4**	**50,3**	**52,7**	**53,7**	**44,6**	**46,2**
	€/MWh *							
	32,2	**26,5**	**23,2**	**25,1**	**26,3**	**26,8**	**22,3**	**23,1**

*) Oletettu, että puun energiasisältö 2,0 MWh/m^3.

LIITE 6

Tuotantoketjujen kokonaistuotantokustannukset (ks. kuva 42).
Korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta 11 cm (taulukko 2), metsäkuljetusmatka 300 m, kaukokuljetusmatka 100 km ja kuormakoot kuvien 39 ja 41 mukaiset (ks. kuva 42).

Kustannustekijä	Kuitupuun erillishankinta (Yksinpuin)	Kuitupuun erillishankinta (Joukkokäsittely)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/TV)	Energiapuun erillishankinta (Kokopuu/KP)	Energiapuun erillishankinta (Energiapuupaalit/KP)	Integroitu hankinta (Kuitupuupaalit)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Kuitupuu)	Integroitu hankinta (Kaksi kasaa / Energiapuu/TV)
	€/m^3							
Kantohinta	11,0	11,0	6,0	6,0	6,0	6,0	11,0	4,0
Hakkuu	18,3	14,6	8,6	8,6	25,7	25,7	9,3	9,3
Metsäkuljetus	5,2	5,2	6,7	6,7	2,7	2,7	7,6	7,6
TV-haketus	-	-	8,0	-	-	-	-	8,0
Kaukokuljetus	9,3	9,3	9,8	19,7	9,4	9,4	9,3	9,8
KP-murskaus	-	-	-	2,0	1,6	-	-	-
Terminaali	1,0	1,0	-	-	-	1,0	1,0	-
Kuorinta	0,4	0,5	-	-	-	0,8	0,5	-
Haketus selluhakkeeksi	0,8	0,8	-	-	-	0,8	0,8	-
Yleiskustannukset	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
YHTEENSÄ	**49,2**	**45,6**	**42,2**	**46,1**	**48,5**	**49,5**	**40,3**	**41,9**
	€/MWh *							
	24,6	**22,8**	**21,1**	**23,1**	**24,2**	**24,7**	**20,2**	**20,9**

*) Oletettu, että puun energiasisältö 2,0 MWh/m^3.