



Juha Laitila



Kari Väättäinen

Juha Laitila ja Kari Väättäinen

Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus

Laitila, J. & Väättäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. Metsätieteen aikakauskirja 2/2011: 107–126.

Tutkimuksen tavoitteena oli: 1) Selvittää kuormaus- ja purkuajat, ajankäytön rakenne sekä kuormakoko rangan ja kokopuun autokuljetuksessa. 2) Verrata rangan ja kokopuun haketustuottavuutta terminaaliolosuhteissa. 3) Tehdä vertailulaskelmat rangan, kokopuun ja kokopuupaalauksen korjuu- ja toimituskustannuksista eri kuljetus- ja haketustavoilla, kaukokuljetusmatkoilla ja hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitoilla.

Kokopuun autokuljetuksen kuormakoko oli 30 m³, kun puutavaraa kuljetettiin umpilaidallisella puutavara-autolla. Kaukokuljetuksessa kuormauksen tehotuntituottavuus oli metsäkuljetuspituu-teen katkotulla kokopuulla 1,0 m³ minuutissa ja viisi metriä pitkällä rangalla 2,5 m³ minuutissa. Kuorman purkamisen tehotuntituottavuus oli vastaavasti kokopuulla 2,6 m³ minuutissa ja rangalla 3,4 m³ minuutissa. Vertailevan aikatutkimuksen perusteella rangan haketuksen tehotuntituottavuus oli 1,22-kertainen kokopuun haketustuottavuuteen verrattuna.

Tehty vertailulaskelma osoitti, että kokopuuna korjuu oli selvästi edullisin vaihtoehto, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli alle 11 cm. Tätä läpimittaa järeämmillä kohteilla kokopuuna tai rankana korjuun välinen kustannusero jäi pieneksi metsähakkeen tuotannossa. Kokopuuna korjuussa tienvarsihaketukseen perustuva hakkeen toimitusketju oli menetelmistä edullisin. Rankana korjuussa haketus tulisi tehdä joko tienvarsivarastolla tai hakkeen käyttöpaikan välittömässä läheisyydessä. Jos toimitusketjussa käytetään terminaaleja, niin kuljetustaloudellisesti tehokkain tapa on kuljettaa kokopuun sijaan karsittua rankaa. Vertailulaskelman perusteella kokopuupaalauksen kilpailukyky oli heikko nuorten metsien energiapuun hankinnassa.

Asiasanat: kokopuu, ranka, haketus, kaukokuljetus, puunkorjuu, metsähake, nuoret metsät
Yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, PL 68, 80101 Joensuu. Sähköposti juha.laitila@metla.fi
Hyväksytty: 2.5.2011

Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff11/ff112107.pdf>

I Johdanto

Nuorten metsien energiapuu on suurin metsähakkeen raaka-ainepotentiaali Suomessa (Laitila ym. 2008, Kärhä ym. 2009b). Energiapuunkorjuu koneellistui 2000-luvulla ja nuorten metsien harvennuksilta lämpö- ja voimalaitoksille ohjautuva energiapuu on valtaosin kokopuuta (Ylitalo 2010). Karsitun puun eli rangan suhteellinen osuus lämpö- ja voimalaitosten energian tuotannossa on pienentynyt ja vuosittaiset korjuumäärät ovat vakiintuneet 100 000–160 000 m³:n tasolle (Ylitalo 2010). Runkaa pienempi hakkuukustannus ja hakekuljettimien toimintavarmuuden paraneminen lämpö- ja voimalaitoksissa ovat vauhdittaneet kokopuuhakkeen käytön kasvua.

Nuorten metsien energiapuun varastointiaika on yleensä vuosi, mutta puuta voidaan varastoida myös ylivuotisena, koska varastoinnin kuiva-ainetappiot ovat huomattavasti pienemmät kuin latvusmassalla. Varastoinnin jälkeen puut haketetaan joko tienvarressa tai ne kuljetetaan hakettamattomina terminaaliin tai käyttöpaikalle. Vuonna 2009 harvennuspuiden hakkeen tuotannossa tienvarsihaketuksen osuus oli neljä viidesosaa kokonaismäärästä (kokonaismäärä 1 565 000 m³, (Ylitalo 2010)). Terminaaleissa tuotetun hakkeen osuus oli 16 % ja käyttöpaikalla haketettiin 5 % (Kärhä 2010). Vastaavasti ainespuumittaisesta, järeästä runkopuusta haketettiin vuonna 2009 lähes 70 % lämpö- ja voimalaitoksilla, 23 % terminaaleissa ja vajaa kymmenes tienvarsivarastoilla (Kärhä 2010).

Käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen heikkoutena on se, että kuljetuksen kuormakoko jää pieneksi, mikä kasvattaa kaukokuljetuksen kustannuksia. Kuormakokoa on pyritty kasvattamaan tiivistämällä latvusmassa hakkuutähdepaaleiksi, nuorten metsien energiapuulla puiden kokopuupaalauksella tai karsinnalla ja määrämittaan katkonnalla sekä kanto- ja juuripuulla puuaineksen pilkonnalla (Laitila ym. 2008, Ryymän ym. 2008, Kärhä ym. 2009a). Terminaalien käyttöä puoltavat kuitenkin useat tekijät. Terminaaleista metsähaketta voidaan toimittaa eri kokoluokan laitoille, junakuljetuksiin ja terminaali toimii puskurivarastona esimerkiksi kelirikkoaikana parantaen toimitusvarmuutta, jolloin sivuteiden käyttö on rajoitettua raskaan liikenteen osalta. Terminaaleilla voidaan myös tasata metsähakkeen

käytön talviaikaisia kulutushuippuja (Laitila ym. 2008, Ryymän ym. 2008).

Haketuksen keskittäminen käyttöpaikalle tai terminaaliin mahdollistaa suuret vuotuiset haketustuotokset ja korkeat koneiden käyttöasteet, mikä alentaa haketuskustannuksia (Asikainen ym. 2001, Ranta 2002). Keskitettyllä haketuksella päästään eroon ”kuumasta ketjusta”, jolloin tuotantoketjun kukin työvaihe voidaan tehdä niin tehokkaasti kuin kalustolla on mahdollista ilman turhia odotusaikoja (Asikainen 1995, Asikainen ym. 2001). Metsätehon arviointiin mukaan käyttöpaikalla tai terminaalissa tuotetun metsähakkeen suhteellinen osuus tulee kasvamaan ja välivarastohaketusmenetelmän valta-asema pienenevään hakkeen käyttömäärien kasvaessa (Kärhä 2007a,b,c, Kärhä 2010).

Aines- ja energiapuun integroitu korjuu ns. kahden kasan työtekniikalla yleistyy nopeasti (Kärhä 2008, Rieppo 2011), mikä merkinnee sitä, että energiaositekertymältään aiempaa pienemmät kohteet tulevat korjuun piiriin. Pienillä työmailla välivarastohaketuksen perustuvan metsähakkeen tuotantoketjun työajasta merkittävä osa kuluu työmaiden välisiin siirtoihin, minkä vuoksi kokopuun tai rangan autokuljetus ja terminaalissa haketus voi olla kokonaistaloudellisin ratkaisu alle hakeautokuorman kokoisilla työmailla. Joillakin työmailla tilanpuute voi rajoittaa täysperävaunuyhdistelmien käyttöä ja silloin kokopuun tai rangan haketus terminaalissa voi olla järkevämpi ratkaisu kuin hakkeen kaukokuljetus nuppikuomissa.

Hakettamattoman kokopuun tai rangan autokuljetuksen tuottavuudesta ei ole olemassa ajan tasalla olevia tutkimustuloksia. Tuoreimmat suomalaiset ja ruotsalaiset tutkimukset kokopuun autokuljetuksesta ovat 1970-luvulta ja osapuiden autokuljetuksesta 1980-luvulta ja 1990-luvun alusta (Peltola 1976, Salakari ym. 1979, Carlsson ym. 1980a,b, Carlsson ja Larsson 1981, Pennanen 1983, Kahala ja Kuitto 1985, Pennanen 1985, Pennanen 1987, Oijala 1991, Kaipainen 1998). Joukkokäsittelykouralla hakatun, karsitun ja määrämittaan katkotun rangan autokuljetuksesta ei ole julkaistuja tutkimustuloksia. Ajo- ja ajoneuvojen painoja ja mittoja koskevat säädökset ovat muuttuneet, samoin kuin autokuormainten voima ja käytettävyyden parantuneet 1980- ja 1990-lukujen alun tilanteista (Oivanen 1995, Korpilahti 1996, Kaipainen 1998, Peltola 2004). Terminaali-

haketuksen tuottavuustutkimukset ovat puolestaan keskittyneet latvus- ja kantohakkeen tuotantoon (Pulkkinen ja Asikainen 1996, Asikainen ja Pulkkinen 1998, Ahonen ja Tervo 2000, Korpinen ym. 2007). Lisäksi kokopuun ja rangan terminaalihaketuksen tuottavuudesta ei ole saatavilla vertailevaan aikaututkimuksen perustuvia uusia tutkimustuloksia (Verkasalo 1987).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli:

- 1) Selvittää kuormaus- ja purkuajat, ajankäytön rakenne sekä kuormakoko rangan ja kokopuun autokuljetuksessa.
- 2) Verrata rangan ja kokopuun haketustuottavuutta terminaaliosuhteissa.
- 3) Tehdä vertailulaskelmat rangan, kokopuun ja kokopuupaalauksen korjuu- ja toimituskustannuksista eri kuljetus- ja haketustavoilla, kaukokuljetusmatkoilla ja hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitoilla.

Taulukko 1. Aikaututkimuksessa mukana olleiden autokuormien ominaisuudet.

| Materiaali | Niput, kpl (vetoauto & perävaunu) | Kuorman paino, kg | Kuormakoko, m ³ |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Mänty- & koivuranka | 5 m & 3 × 3 m | 30 180 | 38,2 |
| Mäntyranka | 5 m & 2 × 5 m | 33 200 | 42,0 |
| Mäntyranka | 5 m & 2 × 5 m | 34 000 | 43,1 |
| Koivuranka | 3 m & 3 × 3 m | 33 200 | 42,0 |
| Sekaranka, vajaa 2/3 kuorma | 5 m & 5 m | 14 960 | 18,9 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 17 140 | 27,9 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 18 420 | 30,0 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 17 420 | 28,4 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 19 360 | 31,6 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 18 720 | 30,5 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 18 700 | 30,5 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 18 060 | 29,4 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 17 880 | 29,1 |
| Kokopuu | 1 & 2 nippua | 19 160 | 31,2 |

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Autokuljetuksen aikaututkimukset

2.1.1 Kokopuun ja rangan ominaisuudet

Tutkimuksessa selvitettiin kokopuun kuormauksen ja purkamisen ajanmenekki sekä kaukokuljetuksen kuormakoko. Saatuja tuloksia verrattiin rangan kuormauksen ja purkamisen ajanmenekkiin sekä kaukokuljetuksen kuormakokoon. Tutkimus tehtiin vertailevana aikaututkimuksena Haapavedellä 17.–19.5.2010. Aineisto koostui viidestä perävaunullisesta autokuormasta rankaa ja yhdeksästä perävaunullisesta autokuormasta metsäkuljetuspituuteen katkottua kokopuuta. Kokopuuta ajettiin terminaaliiin 165 tuoretonnia (269 m³) ja rankaa 146 tuoretonnia (184 m³). Kuormakoko määritettiin punnitsemalla ajoneuvoyhdistelmä siltavaa’alla kuormattuna sekä tyhjänä.

Rankapuuaineisto muodostui seitsemästä puutarvanipusta viisi metriä pitkää mäntyrankaa, seitsemästä nipusta kolme metriä pitkää koivurankaa ja kahdesta nipusta viisi metriä pitkää sekapuuran- kaa. Kokopuu oli koivuvaltaista (n. 60 %) loppuosan koostuessa männystä, kuusesta ja raidasta (n. 40 %). Kokopuun keskipituus oli tienvarsivarastolla mitattuna 8,7 m. Mänty- ja koivurangan rinnankorkeuslä-

pimitta oli 10–12 cm ja sekarangan 5–8 cm. Kokopuun rinnankorkeusläpimitta oli 7–9 cm. Kokopuu oli hakattu kesällä 2009 ja ranka talvella 2010. Sekä ranka että kokopuu oli suoraa. Ranka oli hakattu yksinpuinmenetelmällä ja mitattu hakkuukoneen mittalaitteella. Rangan minimiläpimitta oli koivulla ja männyllä 6 cm ja sekarangalla 3 cm. Kokopuu oli hento-oksasta mutta puut eivät olleet riukuuntuneita. Oksaläpimitta oli 1–3 cm.

Kuljetetuista kuormista otettiin terminaalihaketuksen yhteydessä hakenäytteet kosteuden, palakoon ja kuivatuoretiheyden määrittystä varten. Hakkeen kuivatuoretiheys määritettiin SCAN-CM 43:95 -standardin mukaisella menetelmällä (1995) ja kosteus CEN/TS 14774-2 mukaan (Lindblad ym. 2008). Hakkeen palakoko määritettiin puolestaan CEN/TS 15149-1 mukaan (Suomen standardisoimisliitto 2006). Kosteusnäytteen ja materiaalin kuivatuoretiheyden avulla määritettiin autokuorman koko kiin- tokuutiometreinä (m³).

Rangan kosteus oli haketushetkellä 49,6 % ja kuivatuoretiheys 398 kg/m³. Vastaavasti kokopuun kosteus haketushetkellä oli 41,8 % ja kuivatuoretiheys 357 kg/m³. Taulukossa 1 on eritelty tarkemmin tutkimuksessa mukana olleiden ranka- ja kokopuukuormien ominaisuudet.

2.1.2 Autokuljetuskalusto

Tutkimuksen kokopuu- ja rankakuormat kuljetettiin Volvo FH 460 -puutavara-autolla, jonka kuormatilassa ja perävaunussa oli umpinaiset laidat ja pohja (kuva 1). EnergyBoxx-merkkiset päällirakenteet olivat EHM Oy:n valmistamat (www.ehm.fi). Vetoauton kuormatilan kehystilavuus oli 45 m³ ja perävaunun 105 m³. Perävaunu oli varustettu liikuteltavalla kelkalla, joka mahdollisti ns. peräylytyksen ja siten suuremman kuormatilan koon ilman, että kääntösäde kasvaisi suuremmaksi kuin perinteisellä puutavara-autolla (Ranta ja Rinne 2006). Yhdistelmän kokonaispituus oli 25 metriä. Ohjaamolla varustettu autonosturi oli merkiltään Kesla 2011ZT ja piikkikahmari oli Loglift RX51. Ajoneuvoyhdistelmän omapaino oli tyhjänä 29 760 kg eli noin 8 000–10 000 kg suurempi kuin perinteisellä puutavara-autolla (Peltola 2004).

Kolmiakseliseen vetoautoon sopi yksi kokopuunippu ja neliakseliseen perävaunuun kaksi kokopuunippua. Kuljetettaessa viisimetristä mäntyrankaa, vetoautoon sopi yksi nippu ja perävaunuun vastaavasti kaksi nippua. Lyhyttä kolmemetristä koivurankaa kuormattiin vetoautoon yksi nippu ja perävaunuun kolme nippua. Pieniläpimittaista sekarankaa oli niin vähän, että kuljetettavaa riitti vetoautoon yksi nippu ja perävaunuun yksi nippu. Karsitulla puutavaralla kuormaa ei pystytty kuormaamaan täyteen ajoneuvoyhdistelmän 60 tn kokonaismassarajoitteen takia (pl. pieniläpimittainen ranka) ja kuorman sallittu enimmäiskoko olikin noin 33 tonnia (ks. taulukko 1). Kokopuulla ajoneuvoyhdistelmän 60 tn kokonaismassarajoite (Peltola 2004) ei ylittynyt ja kuormatila voitiin kuormata täyteen. Kuormaimessa oli ajoneuvovaaka, jolla mitattiin kuormatun puutavaran määrä ja estettiin ylikuormien syntyminen.

2.1.3 Aikatutkimuksen työvaiheet

Aikatutkimuksissa kokopuu ja ranka kuormattiin ja purettiin ajoneuvon omalla kuormaimella. Kuormien purku tapahtui Haapaveden pellettitehtaan asvaltoidulle pihalla, jossa ne haketettiin joko samana päivänä (ranka) tai viimeistään vuorokauden kuluttua (kokopuu). Kuormaus- ja purkuolosuhteet olivat



Kuva 1. Autokuljetuksessa käytetty umpilaidallinen puutavara-auto purkamassa kokopuukuormaa terminaalin kentälle.

hyvät, ja työ suoritettiin valoisaan aikaan vuorokaudesta klo 7:00–18:00. Autonkuljettaja oli kokenut ja taitava. Tutkimukseen osallistuneella kuljettajalla oli kahden vuoden kokemus ruokohelpipaalien (pyöröpaali), latvusmassan ja kokopuun autokuljetuksesta tutkimuksessa mukana olleella ajoneuvoyhdistelmällä ja lisäksi aiempi noin 15 vuoden työkokemus perinteisen ainespuun autokuljetuksesta.

Aikatutkimuksissa rangan ja kokopuun kuormauksen ja purkamisen ajanmenekki jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

Kuormaus:

1. Kuormaimen valmistelut ennen ja jälkeen kuormauksen
2. Kuormaus / taakkojen lukumäärä
3. Perävaunun jatkaminen (kelkan siirto)
4. Kuorman järjestely
5. Varastokasan järjestely
6. Työpistesiirot varastolla
7. Varastopaikan ja auton siistiminen kuorman teon jälkeen
8. Keskeytykset (mukana alle 15 minuutin keskeytykset syyn mukaan kirjattuna)

Purku:

21. Kuormaimen valmistelut ennen ja jälkeen kuorman purun
22. Purku / taakkojen lukumäärä
23. Kuorman järjestely purkamisen aikana

24. Kasan järjestely purkamisen aikana
25. Perävaunun lyhentäminen (kelkan siirto)
26. Työpistesiirot purkupaikalla
27. Purkupaikan ja auton siistiminen kuorman purkamisen jälkeen
28. Keskeytykset (mukana alle 15 minuutin keskeytykset syyn mukaan kirjattuna)

Aikatutkimusaineisto kerättiin jatkuvaan kelloaikatutkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä työvaiheet kirjataan niiden vaihtumisajankohdan mukaan. Työvaiheiden ajanmenekit tallennettiin Rufco 901 -maastotietokoneella yhden senttiminuutin tarkkuudella (Nuutinen ym. 2008). Lopullisissa tuloksissa tehoajanmenekki muutettiin 60 jaolliseen sekunti- ja minuuttimuotoon.

Kuormaimen valmistelu kuormaus- tai purkupaikalla alkoi sitä, kun kuljettaja nousi auton ohjaamosta, sulki auton oven ja alkoi siirtyä kohti kuormaimen ohjaamo. Kuormaimen valmistelu päättyi, kun kuormaimen ohjaamo oli ylhäällä työasennossa, tukijalat olivat maassa ja kuormaimen koura alkoi liikkua kohti ensimmäistä kuormaus- tai purkutaakkaa. Kuormaimen ajokuntoon laitto alkoi, kun kuorma oli joko kuormattu täyteen tai se oli purettu, ja kuormainta alettiin siirtämään ajoasentoon. Kuormaimen ajokuntoon laitto päättyi, kun kuormaimen ohjaamo oli laskettu alas, tukijalat oli nostettu ylös ja kuljettaja oli noussut kuormaimen ohjaamosta ja sulkenut sen oven.

Kuormaus- ja purkupaikan siivoaminen alkoi, kun kuljettaja sulki kuormaimen ohjaamon ja alkoi siistiä autoa ja ympäristöä kuormauksen/purun aikana varisseista oksista. Siivoaminen päättyi, kun kuljettaja nousi auton ohjaamoon ja sulki oven. Keskeytykset pitivät sisällään kuljettajan sosiaaliset tauot, puhelut, pienet korjaustyöt sekä muut ympäristön aiheuttamat keskeytykset. Työpistesiirotiin kuului se aika, kun kuljettaja istui auton ohjaamossa ja siirsi autoa kuormaus- tai purkupaikalla uuteen työpisteeseen. Työpistesiiro alkoi, kun kuljettaja istui ohjaamon penkille, sulki oven ja otti käsijarrun pois päältä. Työpistesiiro päättyi, kun kuljettaja pysäytti auton, laitoi käsijarrun päälle ja nousi ohjaamosta.

Kuormauksen ja purkamisen työsykli alkoi, kun kuormaimen koura alkoi liikkua kohti taakkaa ja päättyi, kun taakka oli asetettu paikoilleen, kouran leuat olivat auenneet ja kuormaimen koura alkoi

liikkua kohti uutta kuormaus- tai purkutaakkaa. Kuorman järjestely kuormauksen ja purkamisen aikana piti sisällään kokopuiden latvojen taittelua kuljetuspituuteen, kuorman tiivistämistä kuormaimen paineluliikkeillä sekä puiden järjestelyä ja suorimista kuormatilassa. Kasan järjestely piti sisällään varastokasan pohjan siistimisen, kuormauksessa tai purkamisessa pudonneiden puiden poimimisen sekä toisiinsa takertuneiden puiden irrottamisen toisistaan, puiden suorimisen ja järjestelyn varastopinossa. Perävaunun jatkaminen alkoi, kun perävaunun takaosa oli saatu kuormattua täyteen ja kuljettaja siirsi kelkan taka-asentoon hydraulisesti. Perävaunun lyhentäminen alkoi, kun perävaunun etuosan oli purettu tyhjäksi ja kuljettaja siirsi kelmassa olevan puunipun kuormaimen ulottuville. Kelmalla tarkoitetaan perävaunun kuormatilan osaa, jolla saadaan aikaan ns. peräylitys ja kuormatilan lisäys.

2.2 Kokopuun ja rangan haketuksen aikatatutkimukset

2.2.1 Hakkuri

Tutkimuksessa verrattiin kokopuun ja rangan haketustuottavuutta terminaaliolosuhteissa. Kokopuun ja rangan haketus tehtiin perävaunualustaisella Rudnick & Enners MTH 900 X 1000/13 -rumpuhakurilla (kuva 2). Hakkuri oli vuosimallia 2004 ja se oli peruskunnostettu vuonna 2007. Omalla moottorilla varustetun hakkurin teho oli 500 hv ja paino 19 000 kg. Hakkurin pituus oli 9 650 mm, leveys 2 550 mm ja korkeus 4 000 mm (Rudnick & Enners Maschinen- und Anlagenbau GmbH 2003). Hakkurin syöttöaukon korkeus oli 900 mm ja leveys 1 000 mm. Rummussa oli neljä terää kahdessa rinnakkaisessa rivissä. Aikatutkimuksissa hakkurin terät teroitettiin työvuoron alussa kulmahiomakoneella. Aikatutkimusten aikana kokopuun tai rangan joukossa ei ollut kiviä, jotka olisivat tylsittäneet tai rikkoneet hakkurin teriä kesken työvuoron. Hakkurin vetoauton (Scania 144 G 530) alustalle asennetulla puutavarakuormaimella syötettiin hakkuria. Kuormaimessa oli piikkikahmari ja ohjaamollinen kuormain oli tyyppiä Foresteri 2010T. Kuormaimella varustetun vetoauton kokonaismassa oli 20 tonnia. Hakkurin kuljettaja oli työhön harjaantunut ja taitava. Työko-

kemusta hänellä oli em. hakkurin käytöstä kolmen vuoden ajalta.

2.2.2 Haketuksen aikatutkimukset

Rangan haketuskokeet tehtiin terminaalikentällä välittömästi rangan autokuljetustutkimuksen päättymisen jälkeen illalla 17.5.2010. Kokopuun haketuskokeet tehtiin terminaalissa kokopuun autokuljetuskokeen jälkeisenä päivänä 20.5.2010. Lisäksi pieni erä kokopuuta haketettiin terminaaliosuhteissa tienvarsivarastolla 21.5.2010. Terminaalissa hake puhallettiin suoraan asfalttikentälle hakkurin viereen (kuva 5). Tienvarsivarastolla kokopuu haketettiin suoraan hakkurin vierellä olleen hakeauton kuormatilaan. Ranka- ja kokopuukasojen korkeus oli sekä terminaalissa että tienvarsivarastolla neljä metriä. Terminaalissa haketettiin 114 tuoretonnia rankaa (144 m^3) ja 165 tuoretonnia kokopuuta (269 m^3). Lisäksi tienvarsivarastolla haketettiin kokopuuta $36,7$ tuoretonnia ($56,5 \text{ m}^3$). Rangan kosteus oli $49,6 \%$, terminaalissa haketetun kokopuun $41,8 \%$ ja tienvarsivarastolla haketetun kokopuun $39,1 \%$. Tienvarsivarastolla haketettu koivukokopuu oli hakkattu ja ajettu tienvarsivarastoon edellisenä kesänä ja sen kuivatuoretiheys oli 396 kg/m^3 . Koivukokopuun keskipituus oli $8,5 \text{ m}$ ja rinnankorkeusläpimitta $7\text{--}9 \text{ cm}$.

Kokopuun ja rangan haketuksen työaika jaettiin aikatutkimuksissa seuraaviin työvaiheisiin:

1. Haketukseen valmistautuminen
2. Kasan järjestely
3. Varsinainen haketus
4. Hakkurin tyhjänä pyöriminen
5. Hakkurin työpistesiirot
6. Hakeauton siirtymiset
7. Jälkityöt
8. Keskeytykset (mukana alle 15 minuutin keskeytykset syyn mukaan kirjattuna)
9. Huolto

Aikatutkimusaineiston keruumenetelmä oli sama, kuin autokuljetuksen aikatutkimuksissa ja työvaiheiden kestot tallennettiin Rufco 901 -maastotietokoneella.

Aikatutkimuksissa haketukseen valmistautuminen piti sisällään hakkurin käyttömoottorin käynnistämisen,



Kuva 2. Kokopuun haketusta terminaalissa Haapavedellä.

moottorin kierrosluvun noston, kuljettajan siirtymisen kuormaimelle ja kuormaimen sekä ohjaamon noston työasentoon. Kasan järjestelyssä oksistaan toisiinsa takertuneita puita irroteltiin pinosta sopivan kokoisen kourataakan aikaansaamiseksi. Haketusaika jaettiin varsinainen haketusaikaan (hakkurin torvesta tulee haketta) ja hakkurin tyhjänä pyörimisaika (hakkurin torvesta ei tule haketta). Haketusaika piti sisällään puiden kouraisut, kuormauksen ja syötön hakkuriin sekä syötön auttamisen ja odotusajat hakkurin syötössä. Työpistesiiroissa hakkuria ja/tai hakeautoa siirrettiin pinon vierellä haketuksen aikana. Jälkitöihin kuuluivat hakkurin ajokuntoon laitto sekä haketuspaikan ja hakkurin siistimistyöt. Keskeytykset pitivät sisällään kuljettajan sosiaaliset tauot, puhelut, pienet korjaustyöt sekä muut ympäristön aiheuttamat keskeytykset. Huolto piti sisällään työvuoron aikana tapahtuvan terähuollon.

2.3 Korjuu- ja toimitusketjujen kustannusvertailu

2.3.1 Kustannusvertailun korjuu- ja toimitusketjut

Harvennuspuihakkeen korjuu- ja toimitusketjujen kustannusvertailussa olivat mukana seuraavat toimitusketjut:

- Rangan hakkuu joukkokäsittelymenetelmällä, metsäkuljetus kuormatraktorilla ja rangan kaukokuljetus

terminaaliin puutavara-autolla. Rangan haketus terminaalisissa ja valmiin hakkeen kuljetus käyttöpaikalle perävaunullisella hakeautolla.

- Kokopuun hakkuu joukkokäsittelymenetelmällä, metsäkuljetus kuormatraktorilla ja autokuljetus terminaaliin umpilaidallisella puutavara-autolla. Kokopuun haketus terminaalisissa ja valmiin hakkeen kuljetus käyttöpaikalle perävaunullisella hakeautolla.
- Kokopuun hakkuu ja paalaus paalainharvesterilla, kokopuupaalien metsäkuljetus kuormatraktorilla ja kokopuupaalien kaukokuljetus terminaaliin puutavara-autolla. Haketus terminaalisissa ja valmiin hakkeen kuljetus käyttöpaikalle perävaunullisella hakeautolla.
- Kokopuun ja rangan hakkuu joukkokäsittelymenetelmällä, metsäkuljetus kuormatraktorilla ja puiden haketus tienvarsivarastolla. Hakkeen kuljetus käyttöpaikalle perävaunullisella hakeautolla.

Vertailulaskelmat perustuivat tässä tutkimuksessa saatuihin vertailutuloksiin sekä aiempien tutkimusten julkaistuihin tuloksiin ja teoreettisiin leimikkoinaistoihin.

2.3.2 Leimikkotekijät

Vertailulaskelma tehtiin teoreettisella mäntyleimikkoinaistolla, jossa poistettavan puuston läpimitat rinnankorkeudella olivat 5,6,7,8,9,10,11,12 tai 13 cm ja puiden pituus kasvoi rinnankorkeusläpimitan mukaan 4,6 metristä 11,8 metriin (Laitila ym. 2010). Hakkuupoistuma oli 1 500 runkoa hehtaarilta kaikissa läpimittaluokissa. Rangalla pölkkyjen koko oli 4,4–73 dm³ ja kokopuiden tilavuus oli vastaavasti 8,0–99 dm³. Rangalla hakkuupoistuma oli 6,6–109,5 m³/ha ja kokopuulla 12,0–148,6 m³/ha (Laitila ym. 2010). Laskennassa käytetty ajouraväli oli 20 m ja hehtaarilla oli 600 m ajouraa (Niemistö 1992). Metsäkuljetusmatka oli 300 metriä ja kaukokuljetusmatka 10–160 kilometriä. Kuljetusmatka terminaalisista hakkeen loppukäyttäjälle oli vakioitu vertailulaskelmassa 15 kilometriksi.

Kokopuulla elävän latvuksen latvusmassan määrä laskettiin Hakkilan (1991) latvusmassamallilla, ja biomassan määrä muutettiin kiintotilavuudeksi kuivatuoretiheyskertoimen avulla (Hakkila ym. 1978). Rangalla minimilatuläpimitta oli 4 cm, ja pölkkyjen

pituus oli joko kolme tai viisi metriä. Poikkeuksena olivat puut, joiden käyttöosan pituus tyvellä oli yli kolme metriä mutta alle viisi metriä, katkaisu tehtiin 4 cm:n latvaläpimitan kohdalta (Laitila ym. 2010).

2.3.3 Hakkuu ja metsäkuljetus

Rangan ja kokopuun hakkuun tuottavuus joukkokäsittelymenetelmällä laskettiin Heikkilän ym. (2005) mallilla, joka on julkaistu ”Rankahakkeen kustannuslaskentaohjelmassa” (Laitila 2006). Paalainharvesterin tuottavuus perustui Fixteri II -kokopuupaalaimen tuottavuusmalleihin (Kärhä ym. 2009a). Joukkokäsittelyharvesterin tehotuntituottavuus muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,393 ja kokopuupaalaimen kertoimella 1,460 (Kärhä ym. 2009a).

Kokopuun ja kokopuupaalien metsäkuljetuksen tuottavuus laskettiin Laitilan ym. (2007 ja 2009) ajanmenekkimalleilla. Rangan metsäkuljetuksen tuottavuuden laskentaan käytettiin puolestaan Kuiton ym. (1994) ajanmenekkimallia pitkän kuitupuun metsäkuljetukselle harvennusolosuhteissa (Laitila ym. 2010). Keskiraskaan kuormatraktorin kuormakoko oli rangalla 9,0 m³, kokopuulla 6,0 m³ (Laitila ym. 2010) ja kokopuupaaleilla 24 kappaletta per kuorma (Laitila ym. 2009). Kuormatraktorin tehoajanmenekki metsäkuljetuksessa muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,302 (Kärhä ym. 2009a).

2.3.4 Haketus ja kaukokuljetus

Rangat ja kokopuupaalit kuljetettiin käyttöpaikalle vakiorakenteisella puutavara-autolla. Rangan kuormakoko (48 m³) oli vertailulaskelmassa johdettu viisimetrisen kuitupuun kuormakoosta (Nurminen ja Heinonen 2007) ja kokopuupaaleilla autokuorman kuormakooksi oletettiin 100 kokopuupaalia. Rangalla autokuorma koostui kolmesta viiden metrin puunipusta (1+2 nippua) ja kokopuupaaleilla paalinippuja oli autokuormassa yhteensä kuusi kappaletta (2+4 nippua). Kokopuulla autokuorman koko oli tämän tutkimuksen perusteella 30 m³ (keskiarvo taulukosta 1) ja kokopuunippuja oli kuormassa yhteensä kolme kappaletta (1+2 nippua). Autokulje-

tuksessa kuljetusaikaan kuului tyhjänä ja kuormattuna ajoaika sekä terminaalialiaika. Terminaalialiaika sisälsi kuormauksen, kuorman purkamisen sekä odotus- ja apuajat. Autojen tyhjänä- ja kuormattuna ajon ajanmenekit laskettiin Nurmisen ja Heinosen ajanmenekkimalleilla (2007).

Rangalla 48 m³:n kokoisen rankakuorman kuormauksen ajanmenekki oli tämän tutkimuksen perusteella 19,0 minuuttia ja kuorman purkamisen 14,2 minuuttia. Kokopuupaaleilla vastaava ajanmenekki oli 25,1 minuuttia kuormaukselle ja 17,1 minuuttia kuorman purkamiselle (Laitila ym. 2009). Kokopuulla 30 m³:n kokoisen kokopuukuorman kuormauksen ajanmenekki oli tämän tutkimuksen perusteella 30,0 minuuttia ja kuorman purkamisen 11,6 minuuttia. Lisäksi kuormaimen valmisteluun kului kaikilla autokuormilla tämän tutkimuksen perusteella 2,6 minuuttia kuormauspaikalla ja 2,3 minuuttia purkupaikalla. Sekä kokopuulla että kokopuupaaleilla oletettiin tämän tutkimuksen tuloksien perusteella kuluva kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen kuormaa kohti aikaa yhteensä 4,2 minuuttia. Pankkojen tai kelkan käsittelyyn kului kuormaa kohti aikaa kokopuulla 1,2 minuuttia, rangalla 1,4 minuuttia ja kokopuupaaleilla 2,2 minuuttia tämän tutkimuksen ajanmenekkien ja Laitila ym. 2009 tulosten perusteella laskien. Kuorman sitomiseen ja avaamiseen kului kuormaa kohti aikaa rangalla 9,9 minuuttia ja kokopuupaaleilla 12,5 minuuttia (Laitila ym. 2009). Em. ajanmenekkien lisäksi autokuormille laskettiin kuormakohtainen 25 minuutin lisäajanmenekki, joka pitää sisällään mm. ajoneuvon kääntämiseen metsävarastolla kuluneen ajan sekä autokuorman punnitukseen terminaalin vastaanottoasemalla kuluneen ajan.

Kokopuun haketuksen käyttötuntituottavuus välivarastolla oli tässä vertailulaskelmassa 34 m³ (kiintokuutiometriä) ja terminaalissa 44 m³ eli samat kuin Laitila (2008) tutkimuksessa. Tässä tutkimuksessa tehdyn vertailevan aikatutkimuksen perusteella rangen haketustuottavuus oli 1,22-kertainen verrattuna kokopuun haketustuottavuuteen. Rangalla välivarastohaketuksen käyttötuntituottavuus oli näin ollen 41 m³ ja terminaalihaketuksen tuottavuus 54 m³. Kokopuupaalien terminaalihaketuksen tuottavuuden oletettiin olevan sama kuin rangalla.

Hakeauton kuormakoko oli 44 m³ ja kuormausaika metsävarastolla vastasi kuormantekoon kulunutta

haketusaikaa. Em. ajanmenekkien lisäksi hakeauto-kuormalle laskettiin kuormakohtainen 35 minuutin lisäajanmenekki, joka pitää sisällään mm. ajoneuvon kääntämiseen ja perävaunun siirtoon metsävarastolla kuluneen ajan sekä autokuorman purkuun ja punnitukseen vastaanottopisteellä kuluneen ajan.

Terminaalissa hakkeen kuormausaika hakeautoon oli kaikkine apuaikoineen 15 minuuttia. Hakeauton purku hakkeen käyttöpaikalla kesti apuaikoineen 25 minuuttia. Hakkeen kuljetukseen terminaalista käyttöpaikalle käytettiin samanlaista kuljetuskalustoa kuin välivarastohaketuksessa mutta hakekuorman koko oli yhden kiintokuutiometrin verran pienempi, koska pyöräkuormaajalla kuormattaessa hakkeen tiiviys on pienempi kuin hakkurin kuormaamana. Hakkeen kuormauskustannukseksi terminaalissa oletettiin 1 €/m³. Hakkuun, metsäkuljetuksen, haketuksen ja kaukokuljetuksen yksikkökustannukset (€/m³) laskettiin jakamalla käyttötuntikustannus käyttötuntituottavuudella.

2.3.5 Koneiden ja ajoneuvojen käyttötuntikustannukset

Joukkokäsittelytekniikkaa käyttävän hakkuukoneen käyttötuntikustannus oli laskelmassa 81 €/h (Alv 0 %), kuormatraktorin 61 €/h (Alv 0 %) ja Fixteri II kokopuupaalaimen 107 €/h (Alv 0 %) (Kärhä ym. 2009a). Kuorma-autoalustaisen rumpuhakkurin ja kaukokuljetusajoneuvojen käyttötuntilaskelmien perusteet ja yksityiskohdat ovat esitetty taulukossa 2. Kustannukset laskettiin arvonlisäverottomina (Alv 0 %) ja ne ilmoitettiin euroina (€) käyttötuntia kohden (E₁₅-h). Käyttötuntikustannuksissa olivat mukana sekä kiinteät (pääoma, vakuutukset, palkka, hallinto jne.) että muuttuvat kustannukset (poltto- ja voiteluainekustannukset, huolto ja kunnossapitokustannukset sekä työmatka- ja koneen siirtokustannukset). Vuotuisiin kokonaiskustannuksiin lisättiin lopuksi 5 % laskentariskimarginaali, mikä piti sisällään myös ns. yrittäjärisikin. Laskenta perustui yleisesti käytettyyn metsäkoneiden kustannuslaskentatapaan (Harstela 1993).

Hakkurin ja ajoneuvojen arvonlisäverottomat hankintahinnat saatiin konevalmistajilta sekä jälleenmyyjiltä. Laskelmassa hakkurin ja ajoneuvojen pitoaika vakioitiin 12 000 käyttötunniksi (4,6 vuot-

Taulukko 2. Haketuksen ja kaukokuljetuksen käyttötuntikustannuslaskelmat.

| | Haketus välivarastolla | Haketus terminaalissa | Hake- rekka | Biomassa- rekka | Puutavara- rekka |
|---|---------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Hankintahinta, € (Alv 0 %) | 500 000 | 500 000 | 301 641 | 335 420 | 300 420 |
| Jäännösarvo, € (Alv 0 %) | 200 000 | 200 000 | 120 656 | 134 168 | 120 168 |
| Pitoaika vuosina | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 4,6 |
| KIINTEÄT KUSTANNUKSET | | | | | |
| Poistot, €/vuosi | 65 217 | 65 217 | 39 345 | 43 750 | 39 185 |
| Korko, €/vuosi | 26 115 | 26 115 | 15 771 | 17 254 | 15 484 |
| Vakuutukset, €/vuosi | 10 216 | 10 216 | 6357 | 6 357 | 6 357 |
| Hallinto, €/vuosi | 5 000 | 5 000 | 7 237 | 7 259 | 7 259 |
| TYÖVOIMA KUSTANNUKSET | | | | | |
| Vuotuiset käyttötunnit, h | 2 600 | 2 600 | 2 600 | 2 600 | 2 600 |
| Vuotuinen työaika, h | 4 000 | 3 050 | 3 050 | 2 808 | 2 808 |
| Toiminnallinen käyttöaste, % | 65 | 85 | 85 | 93 | 93 |
| Työntekijän tuntipalkka, €/h | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 | 15,5 |
| Välikustannukset, % | 68 | 68 | 68 | 68 | 68 |
| Vuotuiset työvoimakustannukset yhteensä, €/vuosi | 104 160 | 79 422 | 79 422 | 73 120 | 73 120 |
| KÄYTTÖKUSTANNUKSET | | | | | |
| Polttoaineen hinta, €/litra (Alv 0 %) | 0,65 | 0,65 | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| Vuotuiset polttoainekustannukset, €/vuosi (Alv 0 %) | 100 555 | 110 130 | 45 657 | 48 060 | 48 060 |
| Vuotuiset voiteluainekustannukset, €/vuosi (Alv 0 %) | 15 000 | 15 000 | 2 354 | 2 354 | 2 354 |
| Vuotuiset huolto ja kunnossapitokustannukset, €/vuosi (Alv 0 %) | 45 000 | 45 000 | 19 193 | 19 193 | 19 193 |
| Siirrot & korvaukset ajo, €/vuosi | 9615 | 2307 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Laskentamarginaali (5 %), € vuodessa | 20 046 | 18 864 | 11 465 | 11 571 | 11 237 |
| VUOTUISET KUSTANNUKSET YHTEENSÄ, € (Alv 0 %) | 400 924 | 377 271 | 229 300 | 231 420 | 224 750 |
| Käyttötuntikustannus, €/h (Alv 0 %) | 154,2 | 145,1 | 88,2* & 63,3** | 89,0* & 63,2** | 86,4* & 60,7** |

* Tuntikustannus ajossa. **Terminaalijan tuntikustannus (kuormaus-, purku- ja odotusaika)

ta). Jäännösarvo oli 40 % hakkurin ja ajoneuvojen uushankintahinnasta ja laskelman laskentakorko oli 6 %. Toiminnallinen käyttöaste (MU), joka kuvaa koneiden ja ajoneuvojen valmiutta toimia käytännön toiminnassa ja on käyttöajan ja työajan välinen suhdelu, saatiin hakkurille ja ajoneuvoille aiemmasta harvennusmetsien energiapuun korjuuta käsitelleestä tutkimuksesta (Laitila 2008). Työvoima, polttoaine, huolto ja korjauskustannukset koottiin konevalmistajien, jälleenmyyjien, Metsäalan Kuljetusyritykset ry:n sekä Öljy- ja Kaasualan Keskusliiton tietokannoista. Ajoneuvojen tuntikustannuslaskennassa kustannukset laskettiin erikseen sekä ajoajalle että kuormaus- ja purkuajalle (terminaaliaika). Hakku-

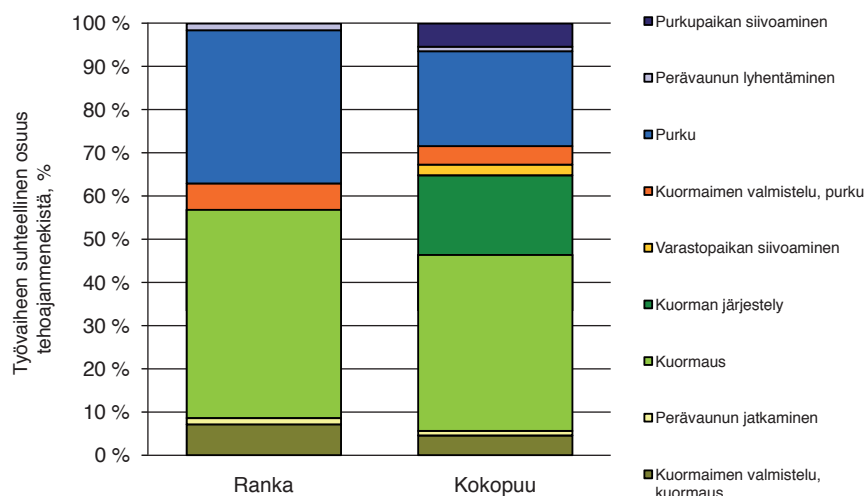
rilla käyttötuntikustannukset laskettiin erikseen välivarastohaketukselle ja terminaalihaketukselle.

3 Tulokset

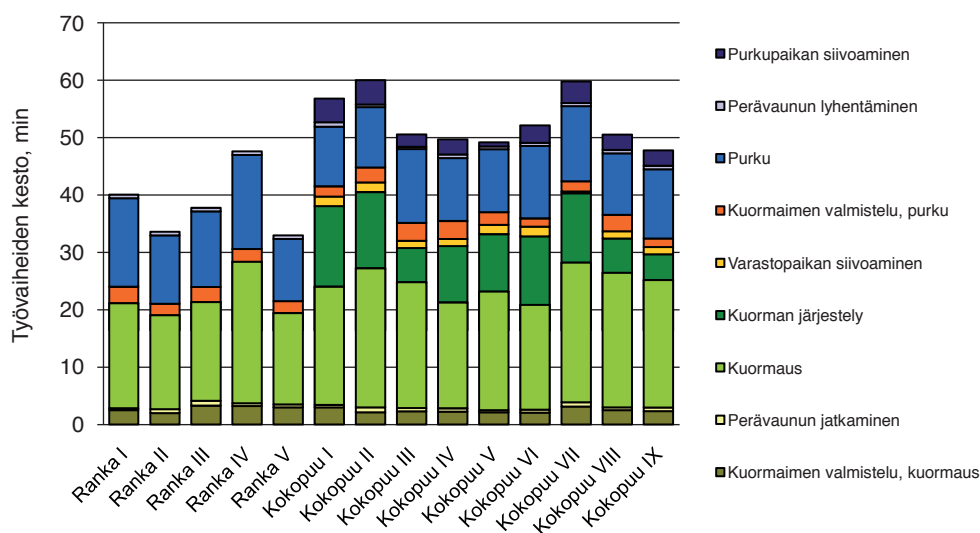
3.1 Kuormauksen ja purkamisen ajanmenekit kokopuulle ja rangalle

3.1.1 Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit

Aikatutkimuksen työvaihejaottelulla tehotyöajasta kului kokopuun kuormaukseen varastopaikalla 41 %



Kuva 3. Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit rangan ja kokopuun kuormaukseen ja purkamiseen liittyvissä työvaiheissa.



Kuva 4. Työvaiheiden ajanmenekit rangan ja kokopuun kuormauksessa ja purkamisessa auto-kuormittain.

ja kuorman purkamiseen terminaalissa 22 % (kuva 3). Kokopuukuorman järjestelyyn kului tehotyöajasta 18 %. Kuorman järjestelyssä kuljettaja taivutti kokopuiden latvoja kuormatilassa lyhyemmiksi, siksi että ylipitkät kokopuut sopisivat kuormatilaan ja että kuormasta tulisi näin tiiviimpi. Kuormaimen valmisteluun kuormasta ja ajoa varten kului metsävarastolla 5 %

tehotyöajasta ja purkupaikalla 4 %. Varastopaikan ja kuormatilan siistimiseen kuormaus- ja purkupaikalla kului tehotyöajasta 5 %. Perävaunun jatkamisen eli kelkan siirtoon taka-asentoon kului kuormauspaikalla 1 % tehotyöajasta ja perävaunun lyhentämiseen, eli kelkan siirtoon etuasentoon kului kuorman purkupaikalla 1 % tehotyöajasta (kuva 3).

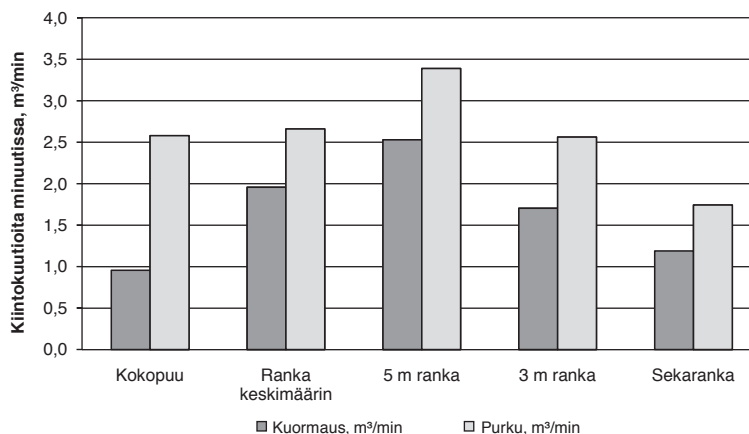
Rangalla kuormauksen osuus tehotyöajasta oli 48 % ja kuorman purkamisen osuus 35 % tehotyöajasta (kuva 3). Varastopaikalla kuormaimen valmisteluun ennen kuormausta ja kuormauksen jälkeen ajoa varten kului 7 % tehotyöajasta. Purkupaikalla kuormaimen kuormanpurku- ja ajokuntoon laittoon kului 6 % tehotyöajasta. Kuormatilan laajentamiseen kuormauspaikalla, eli perävaunun jatkamiseen kului 1 % tehotyöajasta ja kelkan siirtoon lähemmäksi kuormainta kului 2 % tehotyöajasta purkupaikalla. Rangan kuljetuksessa kuormaus tai purkupaikka ei roskaantunut. Lisäksi määrämittaan katkottua rankaa pystyi kuormaamaan kuormatilaan ilman kuorman järjestelyä (kuvat 3 ja 4).

3.1.2 Työvaiheiden kestot

Rangalla kuormanteko- ja purkuaika aputyövaiheineen kesti 39,1 minuuttia per kuorma, kun kuorman käsittelyaika laskettiin kuormakoolla painotettuna keskiarvona. Kokopuulla vastaava kuormankäsittelyaika oli 52,9 minuuttia per kuorma. Työpiste-siirtoihin kuormauspisteestä toiseen kului aikaa 2,1 minuuttia. Aikatutkimuksissa työpistesiiroja kuormauspisteestä toiseen oli kahdella autokuormalla. Purkupaikalla työpistesiiroihin kesken kuorman purkamisen ei ollut tarvetta. Kuormaimen valmisteluun varastopaikalla kului aikaa 2,6 minuuttia ja purkupaikalla 2,3 minuuttia, kun ajanmenekki laskettiin

ranka- ja kokopuukuormien keskiarvona. Kelkan siirtoon kuormauksessa ja purkamisessa kului aikaa 0,6 minuuttia siirtokertaa kohden. Kokopuulla auton ja varastopaikan siivoamisen kuorman teon jälkeen kului aikaa 1,3 minuuttia. Kuorman purkamisen jälkeen purkupaikan, auton ja kuormatilojen siivoamiseen kului aikaa 2,9 minuuttia.

Rangan kuormaus oli huomattavasti tehokkaampaa kuin kokopuun kuormaus, mutta purkamisen ajanmenekki oli kiintokuutiometriä kohden likimain sama (kuva 5). Ohuella sekarangalla pinotiheys oli alempi kuin järeämmällä rangalla, mikä alensi sekä kuormaus että purkutyön tuottavuutta. Kokopuulla kuormauksen tehotuntituottavuus oli 1,0 m³ minuutissa ja kuorman purkamisen tehotuntituottavuus oli 2,58 m³ minuutissa (kuva 5). Kokopuulla kuormauksen ajanmenekissä oli mukana kuorman järjestelyyn (latvojen katkenta) kulunut aika. Rangalla kuormauksen tehotuntituottavuus oli 1,96 m³ minuutissa ja purkamisen 2,66 m³ minuutissa. Pitkällä viisimetrisellä rangalla kuormauksen tehotuntituottavuus oli 2,53 m³ minuutissa ja purkamisessa 3,39 m³ minuutissa. Lyhyellä kolmimetrisellä rangalla tehotuntituottavuus kuormauksessa oli 1,70 m³ minuutissa ja purkamisessa 2,56 m³ minuutissa. Ohuella kolmimetrisellä sekarangalla kuormauksen tehotuntituottavuus oli 1,19 m³ minuutissa ja purkamisessa 1,74 m³ minuutissa (kuva 5).

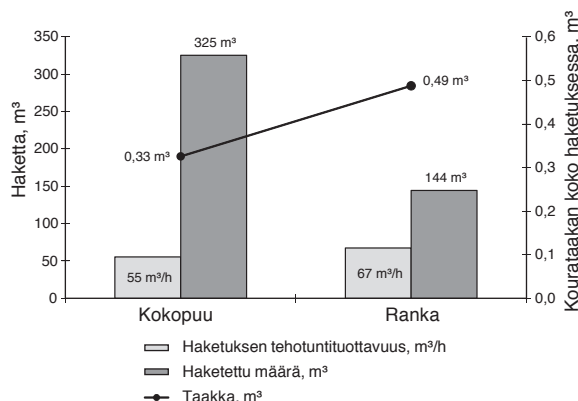


Kuva 5. Kuormauksen ja purkamisen tehotuntituottavuus kiintokuutiometreinä (m³/min) kokopuulla ja rangalla.

3.2 Kokopuun ja rangan haketustuottavuus ja hakkeen palakokojakauma

Haketuksen aikatutkimuksissa hakkurin työpistesiirron ajanmenekki oli varastopinolla 4,5 minuuttia ja haketukseen valmistautuminen vei aikaa haketuksen alussa tai työpistesiirron jälkeen 2,4 minuuttia. Haketuksen tehontuntuottavuus kokopuulla, kun teholliseen haketusaikaan laskettiin varsinainen haketusajan (hakkurintorvesta tulee haketta) lisäksi hakkurin tyhjänä pyörimisaika (hakkurintorvesta ei tule haketta), oli 55 m³/h (kuva 6). Rangalla vastaava tehontuntuottavuus oli 67 m³/h. Kokopuulla hakkuriin syötettävän kourataakan koko oli 0,33 m³ (211 kg) ja rangalla 0,49 m³ (317 kg) (kuva 6). Puutavarain syöttö hakkuriin oli tehokasta, sillä kokopuulla hakkurin tyhjänä pyörimisaika oli vain 1,5 % ja rangalla 0,9 % tehotyöajasta.

Hakkeen palakokojakaumassa ei ollut merkittäviä eroja kokopuu- ja rankahakkeen välillä (kuva 7). Oksineen haketetulla kokopuulla hienojakoisen hakkeen (palakoko < 8 mm) osuus oli luonnollisesti suurempi kuin rankahakkeella (kuva 7). Ranka oli lyhyempää kuin kokopuu ja sillä oli tietty latvaläpimitta, mikä näkyi siinä, että rankahakkeella palakokoluokkien 63 mm ja 100 mm osuus oli suurempi kuin kokopuuhakkeella. Em. ero johtui siitä, että rankahakkeen joukossa oli suhteessa enemmän

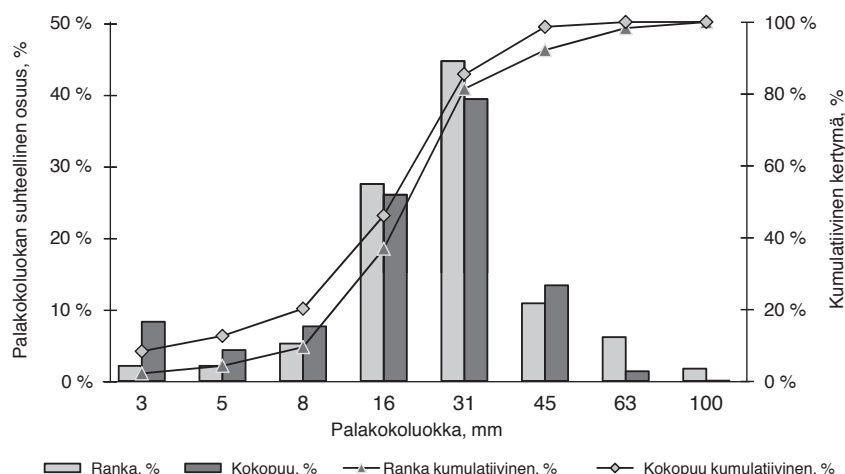


Kuva 6. Kokopuun ja rangan haketuksen tehontuntuottavuus kiintokuutiometreinä (m³/h), taakkakoon keskiarvo haketuksessa (m³) sekä aikatutkimuksissa hakettu puumäärä (m³).

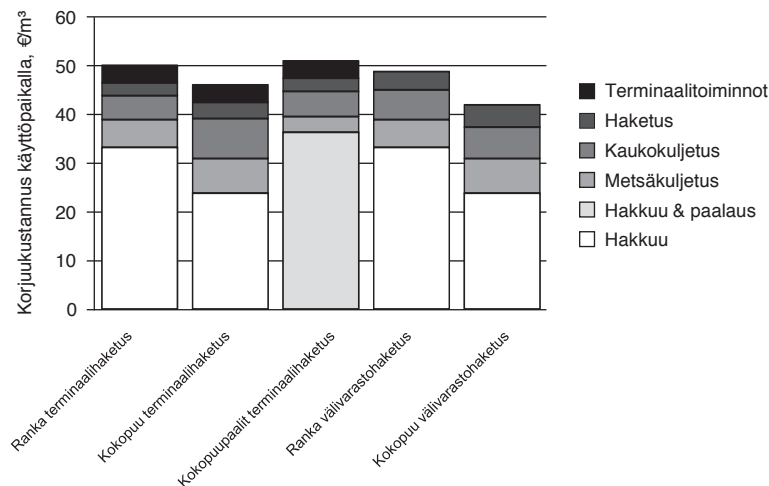
vajaasti hakettuneita pääpaloja kuin rankaa pidemmällä ja latvoineen haketetulla kokopuulla.

3.3 Korjuu- ja toimitusketjuvertailun tulokset

Kokopuu- ja rankahakkeen kustannus käyttöpaikalla oli eri tuotantomenetelmillä 42,0–51,0 €/m³



Kuva 7. Kokopuu- ja rankahakkeen palakokojakauma seulantakokeen perusteella.

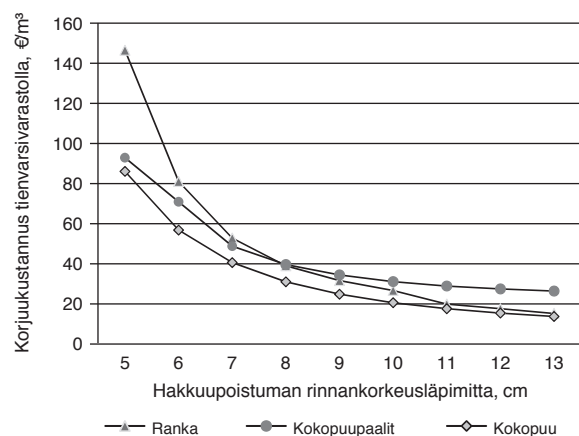


Kuva 8. Kokopuu- ja rankahakkeen kustannusrakenne eri korjuumenetelmillä ja haketustavoilla, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli 8 cm ja metsäkuljetusmatka 300 m. Kaukokuljetusmatka metsävarastolta käyttöpaikalle tai terminaaliin 50 km. Terminaali sijaitsi 15 km:n etäisyydellä käyttöpaikasta.

(kuva 8), kun poistettavan puuston rinnankorkeusläpimitta oli 8 cm, metsäkuljetusmatka oli 300 m ja kun kaukokuljetusmatka metsävarastolta joko suoraan käyttöpaikalle tai terminaaliin oli 50 km. Kokopuun hakkuukustannus oli 23,8 €/m³, rangan 33,2 €/m³ ja kokopuupaalauksen 36,3 €/m³ (kuva 8), kun kokopuun tilavuus oli 28 dm³ ja rangan 19 dm³. Kokopuun metsäkuljetuskustannus oli 7,2 €/m³, rangan 5,7 €/m³ ja kokopuupaalien 3,3 €/m³ (kuva 8), kun kokopuun ja kokopuupaalien hakkuukertymä oli 41 m³/ha ja rangan 29 m³/ha. Kokopuupaalien tilavuus oli kuvan 8 laskelmassa 0,49 m³.

Rangan ja kokopuun kaukokuljetuskustannus terminaaliin oli 4,9 €/m³ ja 8,2 €/m³ ja kokopuupaalien 5,2 €/m³ (kuva 8). Välivarastolla hakettujen kokopuun kaukokuljetuskustannus käyttöpaikalle oli 6,4 €/m³ ja rangan 6,1 €/m³ (kuva 8). Hakkeella erot kaukokuljetuskustannuksissa johtuivat eripituisista hakkeen kuormausajoista, eli eroista tienvarsihaketuksen tuottavuudessa. Terminaalitoiminnoissa hakkeen kuormauskustannus oli 1,0 €/m³ ja hakkeen kuljetuskustannus terminaalista käyttöpaikalle oli 2,6 €/m³. Kuvan 8 korjuuolosuhteissa, kokopuuna korjatun ja välivarastolla hakettujen energiapuun kustannukset käyttöpaikalla olivat vertailun pienimmät.

Kokopuuna korjuun kustannukset olivat alimmat, kun verrattiin eri korjuutavoilla korjatun harvennuspuiden korjuukustannusta tienvarsivarastolla hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitan mukaan (kuva 9). Rankana korjuun ja kokopuupaalauksen kustannusten leikkauspiste oli 8 cm:n rinnankorkeusläpimitan kohdalla (kuva 9). Em. läpimittaa pienemmillä puil-



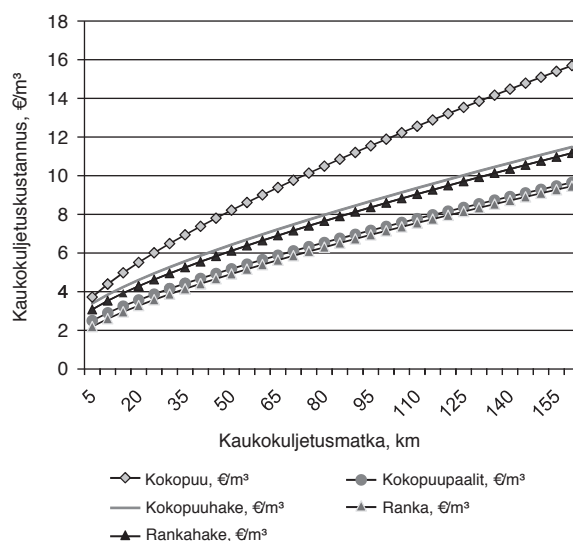
Kuva 9. Kokopuun, rangan ja kokopuupaalien korjuukustannus tienvarsivarastolla rinnankorkeusläpimitan suhteen, kun metsäkuljetusmatka on 300 m.

la kokopuupaalaus menetelmän korjuukustannukset olivat tienvarsivarastolla pienemmät kuin rankana korjuun kustannukset (kuva 9). Ero rangan ja kokopuun korjuukustannuksissa kapeni 2,0–1,5:een €/m³, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli 11 cm tai sitä suurempi (kuva 9).

Rangan kaukokuljetuskustannukset olivat 0,2–0,3 €/m³ alemmat kuin kokopuupaalien kuljetuskustannukset (kuva 10). Kokopuupaalien kaukokuljetuksessa kokopuupaalien kuormaus- ja purkuaikaa hidastaa niiden lyhyys viisimetrisen rankaan verrattuna, vaikka kaukokuljetuksen kuormakoko onkin likimain sama. Pitkällä rangalla vetoautoon mahtuu yksi puunippu ja perävanuun puolestaan kaksi nippua. Kokopuupaaleilla vetoautoon on kuormattava kaksi paalinippua ja vetoautoon puolestaan kolme tai neljä, jotta saavutetaan likimain sama kuormakoko kiintokuutiometreinä (Laitila ym. 2009). Viiden tai kuuden nipun sitomiseen ja kuormaliinon avaamiseen menee puolestaan enemmän aikaa, kuin kolmen rankanipun sitomiseen ja avaamiseen. Lisäksi kokopuupaaleilla kuormaus- ja purkupaikan siivoamiseen on varattava huomattavasti enemmän aikaa, kuin karsitulla puutavaralla (Laitila ym. 2009). Kuvan 10 laskelmassa kokopuupaalin tilavuus oli 0,49 m³.

Kokopuu- ja rankahakkeen kaukokuljetuskustannukset olivat noin 2 €/m³ korkeammat kuin rangan tai kokopuupaalien kaukokuljetuskustannukset (kuva 10). Ero johtuu hakekuorman suuremmasta kuormaus- ja purkuajasta, sekä hieman pienemmästä kaukokuljetuksen kuormakoosta rankaan ja kokopuupaaleihin verrattuna. Rankahakkeen kaukokuljetuskustannus on hiukan alempi kuin kokopuuhakkeen, koska suuremmasta haketustuottavuudesta johtuen rankahakkeen kuormausaika metsävarastolla on lyhyempi kuin kokopuun haketuksessa. Kokopuun kaukokuljetuskustannukset olivat kustannusvertailun suurimmat ja kuljetuskustannukset nousivat muita menetelmiä jyrkemmin kaukokuljetusmatkan kasvaessa (kuva 10).

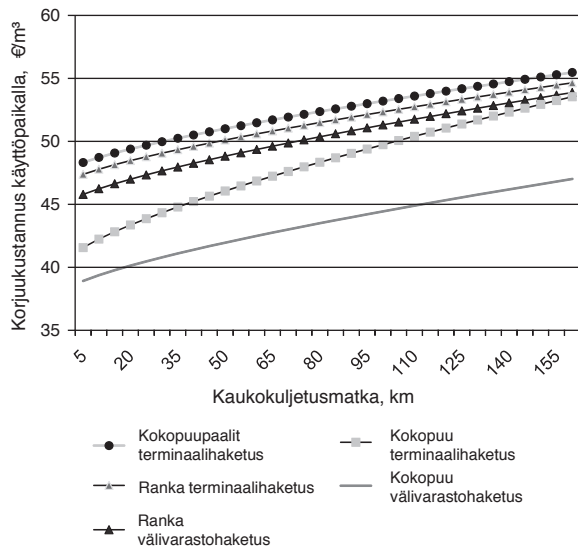
Kuvissa 11 ja 12 on havainnollistettu kaukokuljetusmatkan ja rinnankorkeusläpimitan vaikutusta hakkeen käyttöpaikehintaan eri korjuumenetelmillä. Laskelmissa metsäkuljetusmatka oli 300 m ja hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli joko 8 cm (kuva 11) tai 13 cm (kuva 12). Välivarastolla haketetun kokopuun ja rangan korjuukustannukset



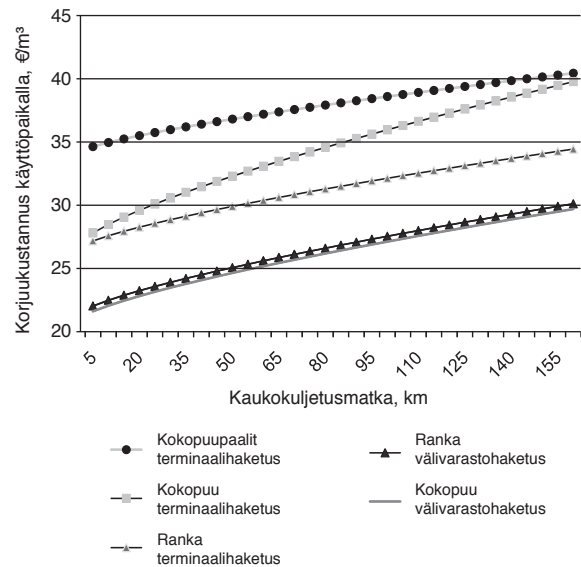
Kuva 10. Kokopuun, rangan, kokopuupaalien sekä ranka- ja kokopuuhakkeen kaukokuljetuskustannukset kuljetusmatkan mukaan.

käyttöpaikeella olivat terminaalissa haketettuun kokopuuhun ja rankaan verrattuna pienemmät kaikilla kaukokuljetusmatkoilla (kuvat 11 ja 12). Ero johtui ylimääräisestä hakkeen käsittely- ja kuljetuskustannuksesta toimitettaessa haketta terminaalista loppukäyttäjälle. Paalaukseen perustuvalla menetelmällä hakkeen korjuukustannukset käyttöpaikeella olivat vertailun kalleimmat (kuvat 11 ja 12). Kuvan 12 laskelmassa paalin kiintotilavuus oli 0,6 m³, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli 13 cm (Kärhä ym. 2009a).

Pieniläpimittaisessa 8 cm:n puustossa kokopuuhakkeen tuotantokustannukset olivat selvästi rankahakkeen tuotantokustannuksia alemmat sekä välivarasto että terminaalihaketusketjuilla (kuva 11). Poistettavan puuston järeytyminen paransi rankana korjuun kannattavuutta merkittävästi (kuva 12) ja rinnankorkeusläpimitaltaan 13 cm olevalla kohteella välivarastolla haketetun kokopuuhakkeen ja rankahakkeen tuotantokustannukset olivat likimain samat. Ero hakkeen toimituskustannuksissa oli käyttöpaikeella 0,4 €/m³ kokopuuhakkeen eduksi. Terminaalihaketusketjussa rankahakkeen tuotantokustannukset olivat selvästi alemmat kuin kokopuuhakkeen tuotantokustannukset, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli 13 cm (kuva 12). Pienilä-



Kuva 11. Ranka- ja kokopuuhakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla eri korjuumenetelmillä kaukokuljetusmatkan mukaan, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimita on 8 cm ja metsäkuljetusmatka on 300 m. Käyttöpaikan ja terminaalin etäisyys 15 km.

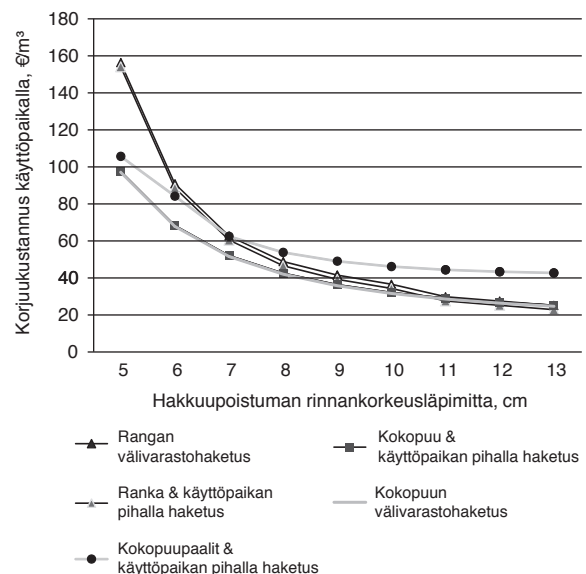


Kuva 12. Ranka- ja kokopuuhakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla eri korjuumenetelmillä kaukokuljetusmatkan mukaan, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimita on 13 cm ja metsäkuljetusmatka on 300 m. Käyttöpaikan ja terminaalin etäisyys 15 km.

pimittaisessa puustossa kokopuun ja rangan korjuun (hakkuu ja metsäkuljetus) välinen kustannusero oli suurempi kuin säästö, joka saatiin, kun terminaaliin ajettiin kokopuun sijasta karsittua rankaa. Rinnan-korkeusläpimitaluokassa 8 cm kokopuun ja rangan välinen ero korjuukustannuksissa tienvarsivarastolla oli 8,0 €/m³ kokopuun eduksi, kun se 13 cm:n rinnankorkeusläpimitalla oli vain 1,5 €/m³ (kuva 9).

Kuvassa 13 verrattiin ranka- ja kokopuuhakkeen kustannusta käyttöpaikalla hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitan mukaan, kun kokopuu, ranka ja kokopuupaalit tuotiin suoraan käyttöpaikan pihalle, jossa oli haketusterminali. Laskelmassa metsäkuljetusmatka oli 300 m ja kaukokuljetusmatka tienvarsivarastolta käyttöpaikalle oli 50 km. Toinen vertailuvaihtoehto oli, että kokopuut ja rangat haketettiin tienvarsivarastolla, josta hake kuljetettiin perävaunullisella hakeautolla suoraan käyttöpaikalle (kuva 13).

Kuvan 13 tulosten perusteella kokopuuna korjuun ja välivarastohaketuksen kustannukset voitiin alittaa rankana korjuun ja terminaalihaketuksen avulla. Edellytyksenä oli, että terminali oli hakkeen



Kuva 13. Ranka- ja kokopuuhakkeen korjuukustannus käyttöpaikalla rinnankorkeusläpimitan mukaan, kun metsäkuljetusmatka on 300 m ja kaukokuljetusmatka on 50 km.

käyttöpaikan välittömässä läheisyydessä, korjattavan puuston rinnankorkeusläpimitta oli vähintään 11 cm, ja että hakkeen käsittelystä käyttöpaikalla ei aiheutunut merkittäviä lisäkustannuksia välivarastolla haketettuun hakkeeseen verrattuna. Em. hakkeen tuotantotavalla voitiin alentaa hakkeen tuotantokustannuksia kokopuun välivarastohaketukseen verrattuna 1–2 €/m³ rinnankorkeusläpimittaluokissa 11–13 cm. Kun haketustermiinaali oli hakkeen käyttöpaikan yhteydessä, kustannuserot haketustapojen välillä käyttöpaikkakustannuksissa olivat pienet sekä kokopuulla että rangalla (kuva 13).

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tämän tutkimuksen perusteella kokopuuna korjuu oli edullisin hakkeen tuotantotapa, kun hakkuupoistuman rinnankorkeusläpimitta oli alle 11 cm. Tätä järeämissä männiköissä kokopuuna tai rankana korjuun välinen kustannusero oli pieni. Tässä tutkimuksessa vertailulaskelmat tehtiin männylle. Koivulla latvusmassan osuus puun maanpäällisestä biomassasta on hieman pienempi kuin männyllä, mikä pienentää kokopuun ja rangan korjuun välistä kustannuseroa. Kuusella latvusmassan osuus maanpäällisestä biomassasta on puolestaan suurempi kuin männyllä (Hakkila 1991).

Puunkorjuutapojen vertailun helpottamiseksi korjuukustannuslaskelmassa käytettiin 1 500 puun vakiorunkolukua hakkuupoistumalle. Näin laske-malla pyrittiin selvittämään, minkä kokoisena puu kannattaa korjata oksineen tai se on järkevää karsia tai kannattaako puuta ylipäätänsä paalata. Puun rinnankorkeusläpimitan mukaan vaihtuvan runkoluvun käyttö olisi ollut perusteltua, jos kyseessä olisi harvennusvoimakkuutta kantorahatulon tai puuntuotoksen näkökulmasta tarkasteleva tutkimus. Puunkorjuun kustannusvertailun kannalta oleellisinta kuitenkin on puun tilavuus kullakin hakkuutavalla ko. läpimitalla. Hakkuupoistuman tiheys vaikuttaa hakkuussa ja metsäkuljetuksessa työpistesiirron tai kuormausajon ajanmenekkiin, joiden osuus em. työläjien kokonaisajanmenekistä on suhteellisen pieni. Lisäksi eri hakkuutavat reagoivat hakkuupoistuman tiheyden muutoksiin samassa suhteessa

toisiinsa nähden, minkä vuoksi vakiorunkoluvun käyttö ei vääristänyt vertailun tuloksia.

Männyn viljelyssä Tapion ohjeiden mukaan tavoitteena on, että runkoluku taimikonhoidon jälkeen on 2 000–2 500 tainta hehtaarilla tai peräti 3 000–4 000 tainta hehtaarilla, jos tavoitteena on männyn laatu-kasvatus tai energiapuun kasvatus osana taimikonhoitoa (Äijälä ym. 2010). Tapion ohjeiden mukaan energiapuuharvennus tehdään 10–12 metrin valta-pituudessa ja kasvamaan jätetään 1 000–1 400 puuta hehtaarille (Äijälä ym. 2010), mikä myös puoltaa laskennassa käytettyä 1 500 rungon hakkuupoistumaa.

Kokopuuna korjuussa tienvarsihaketus oli edullisin korjuuketju, koska hakettamattoman kokopuun autokuljetuksen kuormakoko on varsin pieni, ja koska hakkeen käsittely ja jatkokuljetus terminaalista käyttöpaikalle lisäävät kustannuksia. Rankana korjuussa haketus tulisi tehdä joko tienvarsivarastolla tai hakkeen käyttöpisteen välittömässä läheisyydessä. Jos käytössä on terminaaleja, niin kuljetustaloudellisesti tehokkain tapa on ajaa kokopuun sijasta karsittua rankaa terminaaliin puutavara-autolla.

Pieniläpimittaisen harvennuspuun korjuussa korjuumenetelmien väliset erot ratkaistaan hakkuuvaiheessa, mikä selittää myös sen, että kokopuun korjuukustannukset olivat tässä vertailussa kaikkein pienimmät. Hakkuuvaiheessa syntyneitä kustannuseroa on vaikea kuroa kiinni, etenkin kun operoidaan normaaleilla metsä- ja kaukokuljetusmatkoilla. Vertailussa mukana olleista menetelmistä kokopuun metsä- ja kaukokuljetuskustannukset olivat vertailun korkeimmat, kun taas hakkuukustannukset olivat vertailun alimmat. Tämän tutkimuksen, samoin kuin Kärhä ym. 2009a tutkimuksen, perusteella kokopuupaalauksen kilpailukyky energiapuun hankinnassa on heikko. Kokopuun ja rankahakkeen haketustuotavuuden välinen suhdeluku oli tässä tutkimuksessa samaa luokkaa kuin Verkasalon (1987) tutkimuksessa.

Kokopuun autokuljetuksen kuormakoko oli suurempi kuin viimeaikaisissa korjuumenetelmien vertailulaskelmissa on oletettu (Laitila 2008, Kärhä ym. 2009a, Jylhä ym. 2010). Tässä tutkimuksessa jäi selvittämättä puuston järeyden, katkontapituuden, puulajin ja puiden varastointiajan vaikutus kokopuun kaukokuljetuksen kuormakokoon. Esimerkiksi kokopuupaaleilla paalien kiintotilavuus kasvaa

hakkuupoistuman järeytyessä (Kärhä ym. 2009a). Carlssonin ym. (1983) tutkimuksessa päästiin suuriin kuormakokoihin katkaisemalla osapuut 5–5,5 metrin pituuksiin ja jättämällä latvat ja ohuet puut metsään. Tässä tutkimuksessa ei tutkittu kokopuun kaukokuljetuskuorman tiivistämistä eri menetelmillä, koska yleisesti tulokset ovat olleet varsin vaatimattomia (Kaipainen 1998). Pennasen (1987) mukaan osapuulla kuormatilan laajentaminen parantaa enemmän kuljetustaloutta kuin kalliit ja raskaat tiivistyslaitteet. Carlssonin ym. (1983) tutkimuksessa havaittiin kokopuun varastokasoissa itsetiivistymistä eli painumista varastointiajan pitkittyessä.

Rangan kuljetukseen käytettiin tässä tutkimuksessa samaa kuljetuskalustoa kuin kokopuun autokuljetuksessa, vaikka rankaa on mahdollista kuljettaa myös vakiorakenteisella puutavara-autolla. Tutkimuksessa ollut piikkikahmari on huulilevyllyistä puutavarakouraa kömpelömpi karsitun puutavaran kuormauksessa. Lisäksi kuorman teko ja purku on pankkoautolla nopeampaa koska taakkoja pystyy pujottelemaan tolppien lomitse, toisin kuin umpilaidallisella autolla, jossa kaikki taakat on aina nostettava yläkautta sisään ja pois. Tutkimukseen olisi ollut mahdollista saada vakiorakenteinen puutavara-auto mutta sen kuormaimessa oli erilainen vipujärjestelmä kuin mitä koekuljettajamme oli tottunut ja harjaantunut käyttämään. Tämän vuoksi päädyttiin ratkaisuun, että kaikki puutavara ajettiin samalla kuljetuskalustolla.

Rankana korjuu on eräs keino yksinkertaistaa harvennusten energiapuun hankintaa ja siten alentaa hakkeen tuotantokustannuksia. Voimalaitokselle vakiorakenteisella puutavara-autolla toimitettu rankapuun on mahdollista hakettaa siirrettävällä hakkurilla, joko voimalaitoksen varastosiiloon tai varastoamaan voimalaitoksen pihalle. Voimalaitoksilla, jotka sijaitsevat asutuksen keskellä, käyttöpaikalla haketus ei ole mahdollista pöly ja meluhaittojen takia. Näille voimalaitoksille energiapuu tullaan jatkossakin toimittamaan hakkeena joko välivarastolta tai terminaalista.

Tässä tutkimuksessa, samoin kuin monissa muissakin tutkimuksissa (Erikson ja Björheden 1989, Vartiamäki ym. 2006, Laitila 2008, Kanzian ym. 2009) terminaalissa haketetun hakkeen tuotantokustannukset olivat korkeammat kuin välivarastolla haketetun hakkeen tuotantokustannukset. Eriksonin ja

Björhedenin (1989) mukaan metsähakkeen hankinnan optimointi tarkoittaa käytännössä kuljetuskustannusten minimointia. Terminaalitoiminta pidentää kuljetusmatkoja käyttöpaikoille ja lisää ylimääräisiä työvaiheita, kuten kuormausta ja purkua.

Toisaalta terminaalitoiminta soveltuu tuotantoketjuun hyvin silloin, kun joudutaan yhdistelemään eri kaukokuljetusmuotoja (Karttunen ym. 2009). Autokuljetuksen yhdistäminen juna- tai proomukuljetukseen tuo kustannussäästöjä pitkillä kuljetusmatkoilla (Karttunen ym. 2009). Terminaalit ovat myös varteenotettava keino, kun kehitetään logistisia toimintamalleja, joilla metsähakkeen käytön kulutushuippujen aiheuttamia ongelmia voidaan ratkaista (Laitila ym. 2010). Kanzian ym. (2009) GIS-pohjaisessa tutkimuksessa metsähakkeen kustannus käyttöpaikalla oli vain 10 % suurempi, kun puolet metsähakkeen käyttömäärästä toimitettiin terminaalien kautta. Suuremmilla toimitusmäärillä hakkeen kustannus nousi kuitenkin selvästi jyrkemmin.

Ranka- ja kokopuuhakkeen haketus- ja kuljetuslogistiikan tätä tutkimusta tarkempi selvittäminen vaatii GIS-pohjaista simulointitutkimusta aluetasolla, jossa otettaisiin myös huomioon hyvälaatuisen hakkeen vaikutus eri kokoluokan lämpö- ja voimalaitosten käyttötalouteen, materiaalin kysyntätarjontatilanne, kantohinta, koneiden työllistyminen, hakkeen käsittely- ja vastaanottojärjestelmät, toimitusvarmuus, varastoihin sitoutunut pääoma ja varastoinnin aiheuttamat kuiva-ainetappiot. Tässä tutkimuksessa selvitetty tuottavuus- ja kustannusparametrit luovat hyvän pohjan jatkotutkimukselle ensiharvennuspuun korjuuketjujen osalta.

Tässä tutkimuksessa autokuljetuksen ja haketuksen aikautkimusaineistot perustuivat yhdeltä kuljettajalta lyhyellä aikaa koottuun tutkimusmateriaaliin, mikä rajoittaa tämän tutkimuksen vertailutulosten yleistämistä. Todellisen tuottavuustason ja puutavaralajien välisen tuottavuuseron selville saaminen edellyttäisi laajan seurantatutkimuksen tekemistä, jolloin tutkimuksessa voitaisiin käyttää useita autoja ja kuljettajia sekä erityyppisiä hakkureita eri vuodenaikoina. Myös kokopuuna ja rankana korjuun soveltuvuutta puustoltaan ja korjuuominaisuuksiltaan vaihtelevissa leimikko-olosuhteissa tulisi selvittää tarkemmin.

Kirjallisuus

- Ahonen, A. & Tervo, M. 2000. Turpeen hankintaverkoston käyttö energiapuun hankintaan. Loppuraportti. Tutkimusselostus ENE32/T0035/2000. 99 s.
- Asikainen, A. 1995. Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. Doctoral thesis. University of Joensuu, Faculty of Forestry, Research Notes 38. 86 s.
- & Pulkkinen, P. 1998. Comminution of logging residues with Evolution 910R chipper, MOHA chipper truck and Morbark 1200 tub grinder. *Journal of Forest Engineering* 9(1): 47–53.
- , Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 131. 107 s.
- Carlsson, T. & Larsson, M. 1981. Vidaretransport av trädrester och träddeklar – studier och kostnadskalkyler 1979–1981. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Redogörelse nr 5 1981. 39 s.
- , Hansen, R. & Larsson, M. 1980a. Lastbilstransport av stubbar, träd, träddeklar och hyggesavfall – resultat av studier 1977–79. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten, Redogörelse 1, 1980. 37 s.
- , Hansen, R. & Larsson, M. 1980b. Lastbilstransport av träddeklar – studier 1981–82. Statens energiverk, Stockholm 1983. 4 s.
- , Larsson, M. & Norden, B. 1983. Lastbilstransport av träddeklar – studier 1981–82. Statens energiverk. Stockholm 1983. 4 s.
- Eriksson, L.O. & Björheden, R. 1989. Optimal storing, transport and processing for a forest-fuel supplier. *European Journal of Operational Research* 43(1):26–33.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa (Crown mass of trees at the harvesting phase). *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- , Kalaja, H., Salakari, M. & Valonen, P. 1978. Whole-tree harvesting in the early thinning of pine. *Folia Forestalia* 333. 58 s.
- Harstela, P. 1993. Forest work science and technology, Part I. *Silva Carelica* 25. 113 s.
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s.
- Jylhä, P., Dahl, O., Laitila, J. & Kärhä, K. 2010. The effect of supply system on the wood paying capability of a kraft pulp mill using Scots pine harvested from first thinning. *Silva Fennica* 44(4): 695–714.
- Kahala, M. & Kuitto, P.-J. 1985. Osapuuna korjuu mäntyvaltaisissa myöhemmissä harvennuksissa. *Metsäteho* 14.6.1985. 26 s.
- Kaipainen, H. 1998. Tiivistysparametrit ja -tekniikat puupolttoaineiden metsä- ja kaukokuljetuksessa. VTT Energia. 89 s. + liitteet 5
- Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K. & Ashton, S. 2009. Regional energy wood logistics – optimizing local fuel supply. *Silva Fennica* 43(1): 113–128.
- Karttunen, K., Föhr, J. & Ranta, T. 2009. Energiapienpuun hankintalogistiikka. Esiselvitys ”Energiapuuta Etelä-Savosta”-projektille. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 26 s. + liitteet 5
- Korpilahti, A. 1996. Kuormatilojen kehittäminen energiapuun kuljetusta varten. *Metsätehon raportti* 13. 51 s.
- Korpinen, O.-J., Ranta, T., Jäppinen, E., Hämäläinen, E. & Laitila, J. 2007. Forest fuel supply chain based on terminals and stumps. Julkaisussa: Savolainen, M. (toim.). *Bioenergy 2007. 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition from 3rd to 6th of September 2007, Jyväskylä, Finland. Proceedings. FINBIO julkaisusarja – FINBIO Publication* 36: 399–404.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. *Metsätehon raportti* 410. 38 s.
- Kärhä, K. 2007a. Metsähakkeen tuotannon visiot (The visions of the forest chip production). *BioEnergia* 2/2007: 8–12.
- 2007b. Supply chains and machinery in the production of forest chips in Finland. Julkaisussa: *Bioenergy 2007, 3rd International Bioenergy Conference and Exhibition: 367–374.*
- 2007c. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 ja tulevaisuudessa. *Metsätehon katsaus* 28. 4 s.
- 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: 124–128.*
- 2010. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2009. *Metsätehon tuloskalvosarja* 9/2010. 22 s.
- , Laitila, J., Jylhä, P., Nuutinen, Y. & Keskinen, S. 2009a. Kokopuun paalaus – tuotantoketjun tuottavuus

- ja kustannukset. Metsätehon raportti 211. 68 s.
- , Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T. & Pajuoja H. 2009b. Puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. Metsätehon katsaus 40. 4 s.
- Laitila, J. 2006. Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. *Metsanduslikud Uurimused – Forestry Studies* 45: 5–10.
- 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fennica* 42(2): 267–283.
- , 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.
- , Asikainen, A. & Anttila, P. 2008. Energiapuutarat. Julkaisussa: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. Saatavissa: <http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti>. s. 6–12.
- , Kärhä, K., & Jylhä, P. 2009. Time consumption models and parameters for off- and on-road transportation of whole-tree bundles. *Baltic Forestry* 15(1(28)): 105–114.
- , Heikkilä, J. & Anttila, P. 2010. Harvesting alternatives, accumulation and procurement cost of small-diameter thinning wood for fuel in Central Finland. *Silva Fennica* 44(3): 465–480.
- , Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita - Research Notes 2564. 143 s.
- Lindblad, J., Äijälä, O. & Koistinen, A. 2008. Energiapuun mittaust. Saatavissa: www.metla.fi/metinfo/tietopaketti/mittaust/. 24 s.
- Niemistö, P. 1992. Runkolukuun perustuvat harvennuskallit. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 432. 18 s.
- Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. *Silva Fennica* 41(3): 471–487.
- Nuutinen, Y., Väättäinen, K., Heinonen, J., Asikainen, A. & Röser, D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. *Silva Fennica* 42(1): 63–72.
- Oijala, T. 1991. Osapuun autokuljetuksen ajanmenekki ja kuormien koot Pohjois-Suomessa. *Metsäteho* 30.12.1991. 9 s.
- Oivanen, J. 1995. Puupolttoaineen autokuljetustekniikka. Selvitys hakkeen, osa- ja kokopuun sekä hakkuutähkeen kuljetukseen soveltuvasta autokalustosta. VTT Energia. 57 s.
- Peltola, H. 1976. Kokopuuraaka-aineen autokuljetus. *Metsätehon tiedotus* 340. 16 s.
- Peltola, J. 2004. Puutavara-autojen rakenteen vaikutus omamassaan. 22 s. + liite 1.
- Pennanen, O. 1983. Osapuun autokuljetus. *Metsätehon tiedotus* 382. 15 s.
- 1985. Koko- ja osapuun autokuljetuksen kehittäminen. Ennakkotuloksia. *Metsäteho* 30.1.1985. 14 s.
- 1987. Osapuun autokuljetuksen kehittäminen. Raportti kokeiluista ja tutkimustuloksista. *Metsäteho*. 16 s.
- Pulkkinen, P. & Asikainen, A. 1996. Hakkuutähkeen, karsijan puujätteen, sahan kuorijätteen ja kantojen murskaaminen Morbark 1200 -murskaimella. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1996: 17–26.
- Ranta, T. 2002. Logging residues from regeneration fellings for biofuel production – a GIS-based availability and supply cost analysis. Doctoral thesis, Lappeenranta University of Technology. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 128. 180 s.
- & Rinne, S. 2006. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. *Biomass and Bioenergy* 30(3): 231–237.
- Rieppo, K. 2011. Kuitupuuta vai energiapuuta – karsittuna vai karsimattomana. Korjuukokeita mäntyvaltaisissa ensiharvennuksissa. *TEHO* 1/2011: 8–11.
- Rudnick & Enners Maschinen- und Anlagenbau GmbH. 2003. Betriebsanleitung. Mobiler Trommelhacker REMTH 900x1000/13. Kom. Nr. 3246. 41 s.
- Ryymin, R., Pohto, P., Laitila, J., Humala, I., Rajahonka, M., Kallio, J., Selosmaa J., Anttila, P. & Lehtoranta, T. 2008. Metsäenergian hankinnan uudistaminen. Loppuraportti. HSE Executive Education 8. Saatavissa: http://www.hse.fi/files/1388_JEME-raportti.pdf. 81 s.
- Salakari, M., Kalaja, H. & Salo, E. 1979. Pienkokopuun kaukokuljetus. Kuormaa tiivistävän prototyypilaitteiston kokeilu. *Metsäntutkimuslaitos, metsäteknologian tutkimusosasto* 5/1979. 52 s.
- SCAN-CM 43:95. 1995. Massanvalmistuksessa käytettävä hake, kuiva-tuoretiheys. Scandinavian pulp, paper and board testing committee. Uusittu suomenkielinen käännös. 4 s.
- Suomen standardisoimisliitto SFS. 2006. CEN tekninen spesifikaatio. CEN/TS 15149-1. Kiinteät biopolttoaineet. Palakokojakauman määritysmenetelmä. Osa 1: täryseulamenetelmä (horisontaalinen), seulan aukot 5,15 mm ja yli. 13 s.

- Vartiamäki, T., Ranta, T. & Jäppinen, E. 2006. Large scale forest fuel supply solution through a regional terminal network in Finland. In: World Bio energy 2006. Conference & Exhibition on Biomass for Energy. 30 May–1 June 2006. Jönköping, Sweden. 6 s.
- Verkasalo, E. 1987. Rumpuhakkuri TT 97 R. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 282. 45 s.
- Ylitalo, E. 2010. Puun energiakäyttö 2009. Metsätilastotiedote 16/2010. 7 s.
- Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset. Energiapuun korjuu ja kasvatus. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 56 s.

59 viitettä