

Kantojen, latvusmassan ja harvennuspuun murskaus tienvarsivarastolla kuorma- autoalustaisella CBI 5800 murskaimella

Juha Laitila, Esko Rytönen ja Yrjö Nuutinen

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisu-toiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

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

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

Toimitus

PL 18, 01301 Vantaa
puh. 029 532 2111

sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
PL 18, 01301 Vantaa
puh. 029 532 2111

sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Laitila Juha, Rytönen Esko & Nuutinen Yrjö			
Nimeke Kantojen, latvusmassan ja harvennuspuun murskaus tienvarsivarastolla kuorma-autoalustaisella CBI 5800 murskaimella			
Vuosi 2013	Sivumäärä 29 s.	ISBN ISBN 978-951-40-2413-9 (PDF)	ISSN 1795-150X
Alueyksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Itä-Suomen alueyksikkö / Forestenergy2020 / 3561 Toimitusvarmat ja tehokkaat puubiomassan hankintaketjut metsästä loppukäyttäjälle			
Hyväksynyt Antti Asikainen, professori, 8.2.2013			
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa selvitettiin kantojen, latvusmassan ja harvennuspuun murskaustyön tuottavuus kuorma-autoalustaisella CBI 5800 murskaimella tienvarsivarastolla. Aikatutkimuksissa murskatun puumäärän ja kuljetustiiviuden mittausta varten autokuormat punnittiin käyttöpaikan siltavaa'alla ja kuormista otettiin murskenäytteet kosteuden, kuivatuoretiheyden, palakojakauman ja tuhkapitoisuuden määrittämistä varten. Kuljetustiiviyttä määritettiin autokuljetuskuormien vaakapunnitusten, murskenäytteiden ja hakeautojen kuormatilojen kehystilavuuksien avulla. Aikatutkimusaineisto kerättiin jatkuvaan kelloaikatutkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä eri työvaiheet (taakan nouto, syöttö murskaimeen, odotus, murskaimen ja hakeauton työpistesiiirtymiset jne.) kirjattiin niiden vaihtumisajankohdan mukaan maastotietokoneelle. Murskaustyön tehotuntuottavuus (E_{0h}) ilmaistiin kiinto- ja irtotilavuutta ($m^3/i-m^3$), tuore ja kuivamassaa (kg) sekä metsähakkeen energiasisältöä (MWh) kohden. Lisäksi mitattiin kuljettajaan kohdistuva melu ja värinä sekä kantojen tienvarsimurskauksen aiheuttama melu murskaimen ympärillä.</p> <p>Latvusmassan murskauksen tehotuntuottavuus oli vertailun korkein ($224 i-m^3$ & $81 m^3/E_{0h}$). Kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus oli toiseksi korkein ($198 i-m^3$ & $60 m^3/E_{0h}$) ja vertailun pienin tuottavuus saatiin kantojen murskauksessa ($131 i-m^3$ & $36 m^3/E_{0h}$). Kuivamassoina mitaten latvusmassan murskaustuottavuus oli $29\ 022\ kg/E_{0h}$, kokopuun $24\ 958\ kg/E_{0h}$ ja kantojen $17\ 315\ kg/E_{0h}$. Energiasisällön perusteella latvusmassan murskauksen tehotuntuottavuus oli $135\ MWh/E_{0h}$ ja kokopuun $119\ MWh/E_{0h}$. Kivennäismaasta puhtailla kannoilla laskennallinen tuottavuus oli $85\ MWh/E_{0h}$ ja aikatutkimuksen mukaisilla kannoilla tehotuntuottavuus oli polttomurskeen tuhkapitoisuuden verran alempi, eli $72\ MWh/E_{0h}$.</p> <p>Tulosten perusteella nopeakäyntinen CBI 5800 murskain soveltuu hyvin latvusmassan, pilkottujen kantojen sekä harvennuspuun murskaukseen tienvarsivarastolla. Murskain ei ole myöskään arka materiaalin joukossa oleville epäpuhtauksille. Hakkeeseen verrattuna murskeen kuljetustiiviyttä on pienempi. Autohakkureihin verrattuna murskain oli tehokkaimmillaan latvusmassan murskauksessa. Harvennuspuun murskauksessa tuottavuus oli joko hieman pienempi tai samalla tasolla kuin autoalustaisilla rumpuhakkureilla aiemmissa tutkimuksissa. Raskaisiin terminaali- tai käyttöpaikkamurskaimiin verrattuna CBI 5800 murskaimen tuottavuus kantojen murskauksessa oli selvästi pienempi mutta tienvarsivarastoilla operoiviin hidaskäyntisiin esimurskaimiin verrattuna tuottavuus oli jopa kolminkertainen.</p>			
Asiasanat Kannot, latvusmassa, harvennuspuu, tienvarsihaketus, murskaus, palakoko, melu, värinä, lämpöarvo			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp260.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos, Yliopistokatu 6, 80101 Joensuu. Sähköposti: juha.laitila@metla.fi			
Muita tietoja Raportissa esitetyt melu- ja värinämittaukset liittyivät Työterveyslaitoksen koordinoimaan Metsätalouden työhyvinvoinnin kehittämisojelmiaan 2012–2016 (www.metsahyvinvointi.fi)			

Sisällys

1 Johdanto	5
1.1 Metsähakkeen tuotantoketjut	5
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus	7
2 Aineisto ja menelmät	7
2.1 Kuorma-autoalustainen CBI 5800 murskain	7
2.2 Murskaustyömaat ja raaka-aineet	11
2.3 Aikatutkimuksen toteutus	13
2.4 Murskenäytteiden otto ja murskeanalyysit	14
2.5 Kantojen murskauksen melu- ja värinämittaukset	16
3 Tulokset.....	16
3.1 Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit	16
3.2 Murskauksen tuottavuus	18
3.3 Polttomurskeen ominaisuudet	22
3.4 Murskaustyön aiheuttama melu ja kuljettajaa kohdistuva värinä	25
4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	26
Lähteet	28

1 Johdanto

1.1 Metsähakkeen tuotantoketjut

Metsähakkeen tuotantoketjut voidaan jakaa haketuspaikkansa mukaan keskitetyn ja hajautetun haketuksen menetelmiin (Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Laitila ym. 2011). Haketuksen tai murskauksen keskittäminen käyttöpaikalle tai terminaaliin mahdollistaa suuret vuosituotokset, korkeat koneiden käyttöasteet, pienemmän työvoimantarpeen ja em. mittakaavaedun kautta tavanomaisista alemmat haketuskustannukset (Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Laitila ym. 2011). Käyttöpaikka- ja terminaalihaketuksen heikkoutena on se, että kuljetuksen kuormakoko jää prosessoimattomalla materiaalilla pieneksi, mikä kasvattaa kaukokuljetuksen kustannuksia. Suurten investointikustannusten vuoksi käyttöpaikalla murskaus sopii vain suurille voimalaitoksille. Menetelmän käyttöönottoa voi lisäksi rajata tilanpuute voimalaitoksella sekä voimalaitosalueen melu- ja pölyrajoitukset (Rinne 2010). Terminaaleista haketta voidaan toimittaa eri kokoluokan laitoksille ja terminaali on toimitusvarma puskurivarasto esimerkiksi kelirikko aikaan tai hakkeen käytön kulutushuippujen aikaan talvella (Asikainen ym. 2001, Laitila ym. 2011). Terminaalihaketuksen huonoja puolia ovat mm terminaalikentän kalliit rakentamiskustannukset, suuri varastotilan tarve, materiaalivirtojen ristiinkuljetus sekä hakepuun/hakkeen käsittelykustannukset terminaalissa.

Hajautetun haketuksen menetelmiä ovat välivarastolla tai palstalla tapahtuvaan haketukseen perustuvat korjuuketjut (Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Laitila ym. 2011). Välivarastohaketuksessa materiaali kuormataan haketuksen tai murskauksen yhteydessä hakeauton kuormatilaan. Hakkurin/murskaimen ja hakeauton toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa tienvarsivarastolla, mikä merkitsee sitä, ettei haketusta ja kuljetusta voi juuri limittää. Kaukokuljetusmatkasta riippuen odotusaikojaa tulee joko hakkurille tai hakeautolle. Välivarastohaketusmenetelmässä auton kantavuus ja kuormakoko saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti, ja menetelmä on kuljetustehokas myös pitkillä kaukokuljetusmatkoilla (Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Laitila ym. 2011). Välivarastohaketusjärjestelmä on hakkeen tuotannon perusratkaisu, joka soveltuu sekä pienille että suurille käyttöpaikoille. Haketus tehdään yleensä kuorma-autoalustaisilla tai maataloustraktorisovitteisilla hakkureilla. Lisäksi käytössä on muutamia hakkuri-hakeautoja, joissa haketus- ja kaukokuljetus on integroitu samaan yksikköön. Välivarastohaketuksessa käytettävät murskaimet tai esimurskaimet on yleensä rakennettu puoliperävaunun päälle (Rinne 2010).

Lämpö- ja voimalaitoksille toimitettava metsäpolttoaine on pienittävä kuljettimille ja varastosiiiloille sopivaan palakokoon ja kattilalle polttokelpoiseen muotoon. Pienentämistekniikan mukaan metsähakkeentuotantomenetelmät voidaan haketukseen ja murskaukseen (Rinne 1998, Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Spinelli ym. 2012). Leikkaavateräisten ja nopeakäyntisten hakkurien etuna on hakkeen tasalaatuinen palakoko sekä pienehkö polttoaineen kulutus tuotettua hakekuutiometriä kohden. Hakkureiden heikkous on terien nopea tylsyminen ja tuottavuuden sekä hakkeen laadun aleneminen hakettaessa epäpuhdasta materiaalia (Rinne 1998, Rinne 2010, Spinelli ym. 2012). Murskaimissa materiaalin pienentäminen perustuu iskuun tai repimiseen, eikä niinkään leikkaamiseen, joten terien kunto ei ole niin kriittinen tekijä kuin hakkureissa (Rinne 1998, Asikainen ym. 2001, Rinne 2010, Spinelli ym. 2012). Murskaimet ovat myös rakenteeltaan järeätkoisempia ja siten kestävämpiä kuin hakkurit. Epäpuhtauksia sisältävillä materiaaleilla murskain on selvästi luotettavampi ja tehokkaampi kuin hakkuri. Murskainten heikkous on niiden hakkureita korkeampi polttoaineen kulutus sekä palakooltaan heikompi poltohakkeen laatu, joka rajoittaa polttomurskeen käyttöä pienen kokoluokan lämpölaitoksissa (Rinne 1998, Asikainen ym. 2001, Spinelli ym. 2012). Järeän rakenteen vuoksi murskaimet ovat

varsin painavia ja kookkaita, minkä vuoksi puoliperävaunualustaisilla yhdistelmillä ei ole helppoa toimia ahtailla tai huonosti kantavilla välivarastoilla (Rinne 2010). Suomessa kantohakkeen tuotanto perustuu murskaukseen ja latvusmassa- ja etenkin pienpuu- ja runkopuuhaake tuotetaan pääosin hakettamalla.

Syöttötapansa mukaan hakkurit ja murskaimet voidaan jakaa kahteen päätyyppiin eli vaakasyöttöisiin ja pystysyöttöisiin (Rinne 2010). Roottorin kierrosnopeuden mukaan laitteet voidaan jakaa hidaskäyntisiin (alle 100 kierrosta minuutissa) murskaimiin ja nopeakäyntisiin (yli 600 kierrosta minuutissa) hakkureihin tai murskaimiin (Rinne 2010). Hakkurit ja vasaramurskaimet ovat vaakasyöttöisiä ja nopeakäyntisiä. Vaakasyöttöisillä laitteilla syöttöaukon koko voi rajoittaa työn tuottavuutta, jos taakka on niin suuri, ettei se mahdu kunnolla sisään syöttöaukosta. Pystysyöttöiset murskaimet ovat yleensä joko hidaskäyntisiä kaksiroottorisia murskaimia tai nopeakäyntisiä kaukalomurskaimia (Rinne 2010). Pystysyöttöisten murskainten etu vaakasyöttöisiin laitteisiin verrattuna on se, että syöttöaukko voidaan tehdä suureksi, jolloin murskaimeen voidaan syöttää myös ulkomitoiltaan suurikokoisia taakkoja, kuten huonosti pilkottuja tai jopa kokonaisia kantoja. Pystysyöttöisten laitteiden heikkous on se, että niihin ei voi syöttää pitkää materiaalia, kuten kokopuuta tai rankaa (Rinne 2010). Epäpuhtailla tai suurikokoisilla kappaleilla, kuten kannoilla, murskaus voidaan tehdä työn tehostamiseksi kaksivaiheisesti. Esimurskaus karkeaan palakokoon (palakoko 100–500 mm) tehdään hidaskäyntisellä murskaimella ja jälkimurskaus valmiiksi polttohakkeeksi puolestaan nopeakäyntisellä murskaimella. Kantojen murskauksen tuottavuus riippuu kantopalojen koosta – mitä pienemmät palat, sitä parempi tuottavuus (Rinne 2010).

Metsähakkeen käyttö on kasvanut Suomessa voimakkaasti koko 2000-luvun ajan (Ylitalo 2012). Vuonna 2011 metsähakkeen käyttö oli 7,5 milj. m³ (15 TWh), josta lämpö- ja voimalaitoksien osuus oli 6,8 milj. m³ ja pientalokiinteistöjen kulutus 0,7 milj. m³. Lämpö ja voimalaitoksissa käytetystä metsähakkeesta 45 % oli tehty pienpuusta (koko-, ranka- ja kuitupuu), 33 % latvusmassasta, 14 % kannoista ja 8 % järeästä lahovikaisesta runkopuusta (Ylitalo 2012). Metsähaketta käyttäviä lämpö- ja voimalaitoksia oli 810 kappaletta vuonna 2011 (Ylitalo 2012). Metsähakkeen tuotantoketjuista (kaikki raaka-aineet) välivarastohaketuksen osuus oli 61 % vuonna 2011, terminaalihaketuksen 21 % ja käyttöpaikkahaketuksen 18 % (Strandström 2012). Palstahaketusta ei käytetä Suomessa metsähakkeen laajamittakaavaisessa tuotannossa (Strandström 2012).

Pienpuuhakkeen tuotannossa välivarastohaketusketju on selvästi yleisin tuotantoketju Suomessa. Vuonna 2011 välivarastohaketuksen osuus oli 72 %, terminaalihaketuksen 12 % ja käyttöpaikkahaketuksen 10 % (Strandström 2012). Latvusmassahakkeen tuotannossa tienvarsihaketuksen osuus on myös merkittävä. Vuonna 2011 latvusmassahakkeesta 74% haketettiin välivarastoilla, 15 % käyttöpaikoilla ja 11 % terminaaleissa (Strandström 2012). Kannot on perinteisesti kuljetettu energiapuuautoilla voimalaitoksille tai terminaaleihin, joissa ne on murskattu polttomurskeeksi joko kiinteillä käyttöpaikkamurskaimilla tai suurilla tela- tai puoliperävaunualustaisilla murskaimilla. Vuonna 2011 käyttöpaikkamurskauksen osuus kantohakkeen tuotannosta oli 45 % ja terminaaleissa tuotettiin kantohakkeesta 44 % (Strandström 2012). Uusin suuntaus kantohakkeen tuotannossa on kantojen murskaus tai esimurskaus välivarastolla, josta valmis polttohake toimitetaan käyttöpaikalle ja esimurske jälkimurskaukseen joko terminaalille tai käyttöpaikalle (Kärhä ym. 2011a). Kantojen välivarastolla murskauksen tai esimurskauksen etuja ovat suurempi hyötykuorma autokuljetuksessa kuin kantopaloilla sekä se, että autokuljetuksessa voidaan käyttää vakiorakenteisia hakeautoja erikoisrakenteisten energiapuuautojen sijasta. Vuonna 2011 välivarastolla murskatun ja käyttöpaikalle toimitetun kantohakkeen osuus oli 11 % (Strandström 2012), eli noin 100 000 m³.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tutkimuksessa selvitettiin kantojen, latvusmassan ja harvennuspuun välivarastomurskauksen tuottavuus nopeakäyntisellä CBI 5800 murskaimella, joka oli asennettu kuorma-auton alustalle. Samassa yhteydessä selvitettiin kaukokuljetuskuormien tiiviys em. metsähakelajeilla ja verrattiin murskauskokeessa tuotetun kantohakkeen laatua kokopuu- ja latvusmassahakkeeseen. Lisäksi mitattiin kuljettajaan kohdistuva melu ja värinä sekä kantojen tienvarsimurskauksen aiheuttama melu murskaimen ympärillä.

Aikatutkimuksissa murskatun puumäärän ja kuljetustiiviyyden mittausta varten autokuormat punnittiin siltavaa'alla ja kuormista otettiin murskenäytteet kosteuden, kuivatuoretiheyden, palakokojakauman ja tuhkapitoisuuden määrittystä varten. Kuljetustiiviys määritettiin autokuormien vaakapunnitusten, murskenäytteiden ja hakeautojen kuormatilojen kehystilavuuksien avulla. Aikatutkimusaineisto kerättiin jatkuvaan kelloaikatutkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä eri työvaiheet (mm. taakan nouto, syöttö murskaimeen, odotus, murskaimen ja hakeauton työpistesiiirtymiset jne.) kirjattiin niiden vaihtumisajankohdan mukaan maastotietokoneelle. Murskaustyön tehotuntituottavuus (E_{0h}) ilmaistiin kiinto- ja irtotilavuutta ($m^3/i-m^3$), tuore ja kuivamassaa (kg) sekä metsähakkeen energiasisältöä (MWh) kohden.

Aikatutkimukset toteutettiin yhteistyössä Kuljetusliike Vaahterinen Oy:n ja Stora Enso Metsän kanssa marraskuussa 2011 Varkaudessa, Heinävedellä ja Liperissä. Metsäntutkimuslaitos vastasi aikatutkimusaineiston keruusta, hakenäytteiden otosta ja analysoinnista sekä aikatutkimuksen tulosten laskennasta ja raportoinnista. Työterveyslaitos teki kantojen murskauksen melu- ja värinämittaukset. Aikatutkimuksissa tuotettu kokopuu- ja latvusmassahake toimitettiin Stora-Enso Oyj:n voimalaitokselle Varkauteen ja kantohake Fortum Power and Heat Oy:n Joensuun voimalaitokselle.

2 Aineisto ja menelmät

2.1 Kuorma-autoalustainen CBI 5800 murskain

Tutkittu nopeakäyntinen CBI 5800 murskain oli vaakasyöttöinen ja se oli asennettu neliaksellisen Scania R620 kuorma-auton päälle (Kuva 1 ja 2). Koneyksikkö painoi 31 740 kg (Eliasson 2012). Materiaalin syöttö murskaimeen tehtiin Epsilon M120Z autokuormaimella ja ohjaamollisen kuormaimen ulottuvuus oli 9,7 m. Sekä murskain että kuormain saivat käyttövoimansa Scania R620 kuorma-auton moottorista. Murskainkuorma-auto oli varustettu ReCoDrive-toiminnolla, eli murskainyksikköä pystyi siirtämään työpisteeltä toiselle kuormaimen ohjaamosta käsin. Murskeen poistokuljetin sijaitsi koneyksikön takaosassa. Kuljettimen kuormauskorkeus oli 5 m ja sitä pystyi kääntämään 110 °. Murskaimen syöttöpöydän laidat, syöttöpöytä ja murskeen poistokuljetin taittuivat hydraulisesti kuljetuksen ajaksi (Kuva 2). Murskaimen syöttöpöydän pohjaketjusto oli 4-rivinen ja syöttöleveys oli 1,22 m (Kuva 3). Syöttöpöytä oli murskaimen oikealla sivulla (Kuva 1). Syöttörullan halkaisija oli 762 mm ja syöttörullan hampaat olivat taottua karbidia. Murskaimen roottorin halkaisija oli 1 000 mm, roottorin vasarat olivat kiinteät ja niitä oli roottorissa yhteensä 16 kappaletta. Kuljetusliike Vaahterinen Oy:n murskain oli varustettu MDS-toiminnolla (Metal Detecting System), joka pysäytti murskaimen automaattisesti, jos äänianturi havaitsi syötettävän materiaalin joukossa metallia tai kiviä tms. Kaarevan (180°) seularitilän aukoista puolet oli kooltaan oli 2 x 6 tuumaa ja puolet 3 x 6 tuumaa.



Kuva 1. Kuorma-autoalustainen CBI 5800 murskain siistii varastokasan pohjaa ja odottaa hakeautoa tienvarsivarastolla (J. Laitila/Metla).

Kuorma-autoalustaisen CBI 5800 murskaimen kuljettaja oli erittäin taitava ja työhön harjaantunut, ja hänellä oli yli 5 vuoden yhtäjaksoinen työ- ja yrittäjäkokemus hakkurien käytöstä sekä lisäksi aiempaa työkokemusta latvusmassan metsäkuljetuksesta. Autoalustaisen CBI 5800 murskaimen käytöstä hänelle oli ennättänyt kertyä työkokemusta noin kolmen kuukauden ajalta.

Aikatutkimuksissa tuotettu polttomurske kuormattiin hihnakuljettimella suoraan hakeautoihin, joita oli käytössä kahta eri tyyppiä (Kuva 4 ja 5). Vaihtolavavarustein varustettu hakeauto oli neliakselinen ja murske kuormattiin hakekonttiin, joka nostettiin kippilaitteella murskaustyön ajaksi osittain pystyyn (Kuva 4). Vaihtokonttiauton kaikki kuormat ajettiin ns. nuppikuormina ja kuorman purku puupolttomurskeeseen vastaanottopisteessä tapahtui kippaamalla. Täysperävaununyhdelmässä (Kuva 5) kuorman purku tapahtui ketjupurulla kuormatilan perästä. Kokopuun ja latvusmassa välivarastomurskauksessa polttihaketta kuljetettiin täysperävaununyhdistelmällä sekä konttiautolla ja kantojen murskauksessa kuormat ajettiin pelkästään hake- ja konttiauton nuppikuormina. Yhtä kuormaa lukuun ottamatta (sivustapäin kuormattu kuorma) kaikki kuormat kuormattiin hihnakuljettimella kuormatilan perästä. Täyttöasteen mukaan kaikki kuormat voitiin luokitella täysiksi.



Kuva 2. CBI 5800 murskain valmiina siirtymään uudelle työmaalle (J. Laitila/Metla).



Kuva 3. CBI 5800 murskaimen syöttöpöytä (J. Laitila/Metla).



Kuva 4. Latvusmassan murskausta vaihtolava-auton hakekonttiin (J. Laitila/Metla).



Kuva 5. Latvusmassan murskausta tienvarsivarastolla hakeauton perävaunuun (J. Laitila/Metla).

2.2 Murskaustyömaat ja raaka-aineet

Harvennuspuun murskauskokeet tehtiin 21.11.2012 Varkaudessa Stora Enson tehtaiden välittömässä läheisyydessä. Murskauskokeet suoritettiin ensimmäistä kuormaa lukuun ottamatta päivänvalossa. Tienvarsivarastoja oli kolme kappaletta ja kokopuumenetelmällä korjattu lehtipuuvaltainen sekapuusto oli hakattu ja ajettu varastokasaan vuotta aiemmin marraskuussa 2011 (Kuva 6). Kasat olivat peitetty paperipeitteellä ja puiden katkontapituus oli 5–8 metriä. Kokopuiden tyviläpimitta oli 6–26 cm ja keskimääräinen tyviläpimitta oli silmävaraisesti arvioiden 8–12 cm. Kokopuukasojen korkeus oli noin 4 metriä. Kokopuiden seassa oli rautaputkenpätkiä, rautalankaa ja kettinkiä, jotka aiheuttivat keskeytyksiä murskaustyössä. Aikatutkimuksessa murskattiin kokopuuta yhteensä 61 560 kg (tuoremassa), mikä vastasi neljää nuppikuormaa ja yhtä täysperävaunu kuormaa kokopuumursketta ($291 \text{ i-m}^3/89 \text{ m}^3$). Pilvipoutaisen päivän lämpötila oli $+8 \text{ C}^\circ$ ja maa sekä varastokasat olivat lumettomia

Latvusmassan murskauskokeet tehtiin 22.11.2012 Heinävedellä. Aikatutkimuksissa murskattiin kuusen latvusmassaa yhteensä 160 140 kg (tuoremassa), mikä vastasi kolmea nuppikuormaa ja kolmea täysperävaunuyhdistelmäkuormaa latvusmassamursketta ($585 \text{ i-m}^3/212 \text{ m}^3$). Murskauskokeet suoritettiin ensimmäistä kuormaa lukuun ottamatta päivänvalossa. Tienvarsivarastokasoja oli neljä kappaletta ja niissä ollut latvusmassa oli hakattu kasoille 6.10.2011 ja ajettu tienvarteen 14.6.2012. Latvusmassakasojen korkeus oli noin 4 metriä ja kaikki kasat olivat peitetty paperipeitteellä (Kuva 7). Latvusmassan seassa ei ollut kiviä tms. epäpuhtauksia. Varastokasat sijaitsivat metsäautotien varressa. Pilvipoutaisen päivän lämpötila oli $+5 \text{ C}^\circ$ ja maa sekä varastokasat olivat lumettomia

Kuusen kantojen murskauskokeet suoritettiin Liperissä 26.11.2012 päivänvalossa. Aikatutkimuksessa murskattiin kanto- ja juuripuuta yhteensä 71 300 kg (tuoremassa), mikä vastasi seitsemää nuppikuormaa kantomursketta ($342 \text{ i-m}^3/94 \text{ m}^3$). Murskatut kannot oli nostettu 2.8.2011 ja ajettu tienvarteen varastokasaan 4.11.2011. Varastokasan kantojen kantoläpimitta oli 30–40 cm ja nostotyössä kannot oli pilkottu 2–4 kappaleeseen (Kuva 8). Kantojen joukossa ei ollut kiviä. Varastokasan korkeus oli 5 metriä ja kasa oli peittämätön. Varastokasa sijaitsi kylätien varrella ja kannot oli nostettu pelloksi raivattavalta alueelta. Pilvipoutaisen päivän lämpötila oli $+2 \text{ C}^\circ$ ja maa sekä varastokasa olivat lumettomia



Kuva 6. Peitettyä kokopuuta tienvarsivarastolla (J. Laitila/Metla).



Kuva 7. Latvusmassaa tienvarsivarastolla (J. Laitila/Metla).



Kuva 8. Kantoja tienvarsivarastolla (J. Laitila/Metla).

2.3 Aikatutkimuksen toteutus

Aikatutkimusaineisto kerättiin jatkuvaan kelloaikatutkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä työvaiheet kirjataan niiden vaihtumisajankohdan mukaan (Nuutinen ym. 2008). Työvaiheiden ajanmenekit tallennettiin Rufco 901-maastotietokoneella sekunnin kymmenesosan tarkkuudella. Aikatutkimuksissa maastotyöntekijä oli riittävän turvaetäisyyden päässä murskaimesta niin, ettei hänestä aiheutunut haittaa murskaustyön suorittamiselle. Työmaalla maastotyöntekijällä oli vaadittavat turvavarusteet, eli oranssi huomioliivi sekä kuulosuojaimin varustettu turvakypärä. Tulosten vertailtavuuden vuoksi aikatutkimuksessa käytettiin samaa työvaihejaottelua, kuin Skogforskin tekemässä tutkimuksessa CBI 5800 murskaimesta (Eliasson ym. 2012).

Aikatutkimuksissa murskaimen työskentelyaika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin:

- Kouran vienti kasalle
- Tarttuminen taakkaan
- Kourataakan tuonti murskaimelle
- Kourataakan syöttö murskaimeen
- Syötön avustus
- Murskaus
- Kasan järjestely
- Murskainyksikön käynnistys ja koneen kierrosten sekä työlämpöjen nosto
- Murskaukseen valmistautuminen (tukijalkojen lasku maahan, kuormaimen nosto työasentoon jne.)

- Työpistesiiirtoon valmistautuminen
- Työpistesiiirto
- Murskainyksikön sammuttaminen ja koneen kierrosten lasku
- Kuljettimen yms. puhdistus
- Hakeauton siirtymiset varastopaikalla
- Alle 15 minuutin keskeytykset
- Huolto

Aikatutkimusaineiston analyysissä välivarastomurskauksen tehotyöaikaan (E_{0h}) luettiin kouran vienti kasalle, taakkaan tarttuminen, kourataakan tuonti murskaimelle, kourataakan syöttö murskaimelle, syötön avustus, murskaus ja kasan järjestely (Eliasson 2012). Em. jaottelu tehtiin sen vuoksi, että voitiin verrata murskattavan materiaalin vaikutusta murskaustyön tuottavuuteen. Muiden aikatatkimuksessa tallennettujen työvaiheiden sisällyttäminen tehotyöaikaan olisi vaikeuttanut tulosten vertailtavuutta, koska olosuhteet varastopaikoilla (varastokasojen lukumäärä, epäpuhtauksien määrä, ohikulkeva liikenne, autojen kääntöpaikat jne.) eivät olleet täysin samat tai vertailukelpoiset.

2.4 Murskenäytteiden otto ja murskeanalyysit

Aikatutkimuksissa murskatun määrän ja kuljetustiiviuden mittausta varten autokuormat punnittiin käyttöpaikan siltavaa'alla (kuormattuna ja tyhjänä) ja kuormista otettiin murskenäytteet kosteuden, kuivatuoretiheyden, palakokojakauman, epäpuhtauden/tuhkapitoisuuden sekä lämpöarvon määrittystä varten (SFS-EN 14774-2, SFS-EN 14774-3, SCAN-CM 43:95, SFS-EN 15149-1, SFS-EN 14775, SFS-EN 14918). Autokuormista otetut murskenäytteet analysoitiin Metsäntutkimuslaitoksen laboratoriossa Kannuksessa. Murskeen kuljetustiiviyys määritettiin autokuormien vaaka-punnitusten (täydet kuormat), murskenäytteiden ja hakeautojen kuormatilojen kehystilavuuksien avulla. Kuljetustiiviuden määrittäminen tehtiin karkealla tasolla, eli murskekuormien pintoja ei tasattu varastopaikalla ennen ajoa, eikä kuorman ajon aikaista tiivistymistä arvioitu. Murskenäytteet otettiin joko voimalaitoksen polttoainekentällä välittömästi kuorman purkamisen jälkeen (Kuva 9) tai jos murske meni suoraan polttoon, niin silloin näytteet otettiin voimalaitoksen vastaanottosillalla (Kuva 10) kuorman purkamisen yhteydessä polttoainevirrasta.

Jokaisesta autokuormasta otettiin kolme näytepussia (35 cm x 35 cm pussi) murskettua kuivatuoretiheyden, palakokojakauman, tuhkapitoisuuden ja lämpöarvon määrittystä varten sekä yksi näytepussi (35 cm x 35 cm pussi) kosteuden määrittystä varten. Tiiviuden varmistamiseksi kosteusnäyte pakattiin kaksikertaiseen näytepussiin. Varastokentällä näytteet pusseihin otettiin kasan molemmilta puolilta neljästä eri pisteestä ja noin 0,5 m syvyydeltä. Kantomurskeen näytteet otettiin näytteenottolapiolla (30*25 cm) ja muiden murskelajien näytteet pyöreällä näytteenottokauhalla (halk. 17 cm). Näytteiden otossa käytettiin näytteenottohanskoja ja näytepussit olivat minigrip-sulkimella varustettuja ilmatiiviitä pakastepusseja. Näytteenoton yhteydessä näytepus- sin tehtiin tussilla merkintä murskeen raaka-aineesta, päivä, päivämäärä ja kellonaika. Em. tietojen perusteella murskeanalyysin tulokset voitiin myöhemmin yhdistää autokuormien punnitustuloksiin. Näytepussit pakattiin kuormakohtaisesti mustaan jätessäkkiin ja asetettiin pahvilaatik- koon jatkokuljetusta varten. Näytteiden oton ja pakkauksen tehneellä henkilöllä oli koulutus ympäristönäytteenottoon. Aikatutkimusten ajan murskenäytteet varastointiin viileässä ulkova- rastossa, jossa lämpötila oli +5 – +1 C°.



Kuva 9. Murskekuorman purkua polttoainekentälle (J. Laitila/Metla).



Kuva 10. Hakeautot odottamassa purkuvuoroaan voimalaitoksen vastaanottosiiloon (J. Laitila/Metla).

2.5 Kantojen murskauksen melu- ja värinämittaukset

Melun A-äänitasot kuormaimen ohjaamossa kantojen murskaustyössä rekisteröitiin Larson-Davis 706 meluannosmittarilla yhden minuutin jaksoina ($L_{Aeq, 1 \text{ min}}$). Tuloksena saatiin melun ajallista vaihtelua kuvaava meluprofiili sekä koko mittausjakson keskiäänitaso. Lisäksi mitattiin murskaustyön aiheuttama melu 20 metrin päässä murskaimesta neljästä eri suunnasta, eli murskainyksikön edestä ja takaa, vasemmalta puolelta sekä oikealta etuviistosta melumittarilla B&K 2250. Mittauskorkeus oli noin 1,5 m.

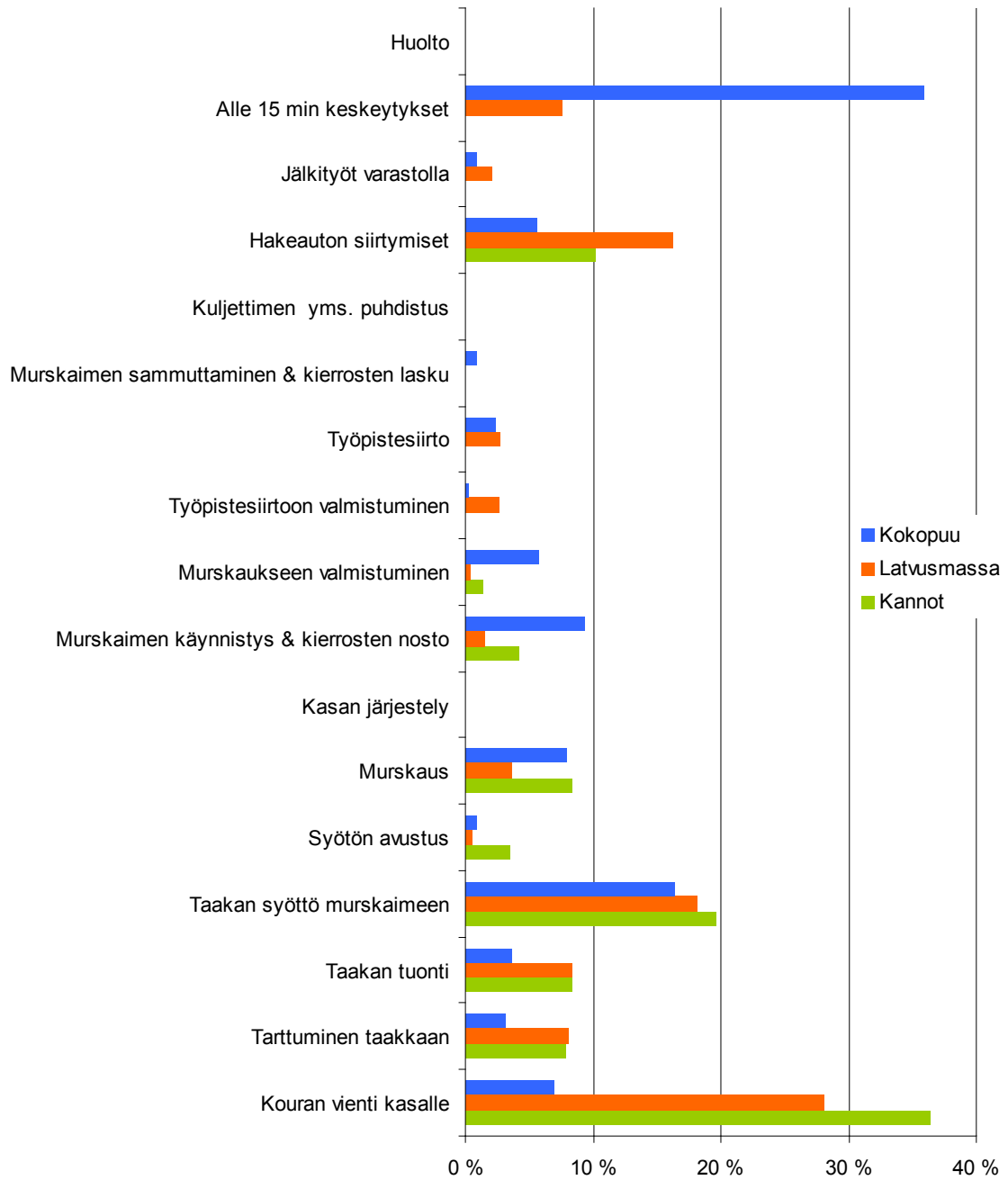
Kuljettajaan istuimen kautta kuormaimen ohjaamossa kohdistuva värinä kantojen murskauksessa mitattiin Larson & Davis HVM100 -mittarilla ja kehotärinäanturilla PCB 356B41 standardin ISO 2631-1:1997 mukaisesti. Värinämittauksissa kehotärinäanturi asetettiin kuljettajan istuimelle työskentelyn ajaksi.

3 Tulokset

3.1 Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit

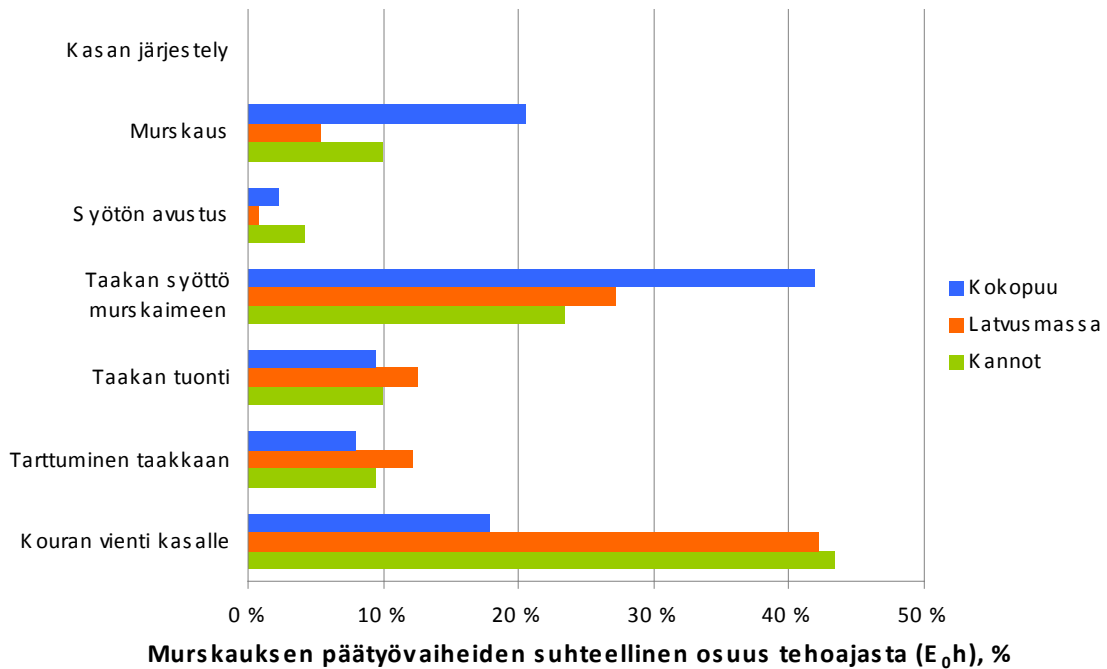
Tehollisen murskaustyön osuus tienvarsimurskauksen käyttöajasta (E_{15h}) oli kokopuulla 39 %, latvusmassalla 67 % ja kannoilla 84 % (Kuva 11). Kokopuun varastokasoissa oli metallia, minkä vuoksi murskaustyö keskeytyi lukuisia kertoja aikatutkimuksen aikana. MDS-toiminnon ja murskaimen kestäväen rakenteen ansiosta vältyttiin murskaimen rikkoontumiselta sekä kalliilta ja tuotantoaikaa vievältä koneremontilta. Keskeytysten takia murskaimen käynnistysten ja murskaukseen valmistautumisen suhteellinen osuus käyttöajasta (E_{15h}) oli kokopuulla luonnollisesti selvästi suurempi kuin mitä latvusmassalla tai kannoilla (Kuva 11). Latvusmassan murskaustyömaalla varastokasoja oli neljä, minkä vuoksi murskaimen työpistesiiirtoihin ja hakeauton siirtymisiin kului aikaa suhteellisen paljon (Kuva 11). Lisäksi työmaa sijaitsi 52 kilometrin päässä käyttöpaikasta ja kuljetuskapasiteettia ei ollut murskaustehoon nähden riittävästi, minkä vuoksi työ keskeytyi ajoittain, kun murskain joutui odottamaan hakeautoja tienvarsivarastolla (Kuva 11). Kuljetusongelmia lisäsi hakeautojen jonotusajat käyttöpaikan vaa'alla tai hakkeen vastaanottosiilolla. Kantojen murskauksessa toiminnallinen käyttöaste oli korkein, koska kannot olivat yhdessä suuressa kasassa tienvarsivarastolla, kantojen seassa ei ollut kiviä tai metallia, eikä murskain ei joutunut odottelemaan hakeautoja murskaustyömaalla (Kuva 11). Kuljetusmatkaan ja murskaustehoon suhteutettuna kuljetuskapasiteettia oli riittävästi ja hakeautot eivät joutuneet odottamaan käyttöpaikan vaa'alla tai purkupaikalla.

Kannoilla ja latvusmassalla murskauksen päätyövaiheiden (kouran vienti kasalle, taakkaan tarttuminen, kourataakan tuonti murskaimelle, kourataakan syöttö murskaimelle, syötön avustus, murskaus ja kasan järjestely) suhteelliset osuudet tehotyöajasta olivat samankaltaiset (Kuva 12). Selkeimmät erot työvaiheiden jakaumassa olivat syötön avustuksessa ja murskauksessa. Latvusmassan murskauksessa syöttöä ei juuri tarvinnut avustaa ja lisäksi murskain rouhi latvusmassaa polttomurskeeksi tehokkaasti, ettei kuormaustyön tullut taukoja (Kuva 12). Kokopuulla taakan pituus oli kantoihin ja latvusmassaan verrattuna selvästi suurempi (5–8 m), minkä vuoksi (pelkän) murskauksen osuus tehotyöajasta oli selvästi suurempi kuin kannoilla ja etenkin latvusmassalla (Kuva 12).



Murskauksen kaikkien työvaiheiden suhteellinen osuus käyttöajasta (E_{15h}), %

Kuva 11. Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit käyttöajasta (E_{15h}) kokopuun, latvusmassan ja kantojen murskauksessa tienvarsivarastolla.

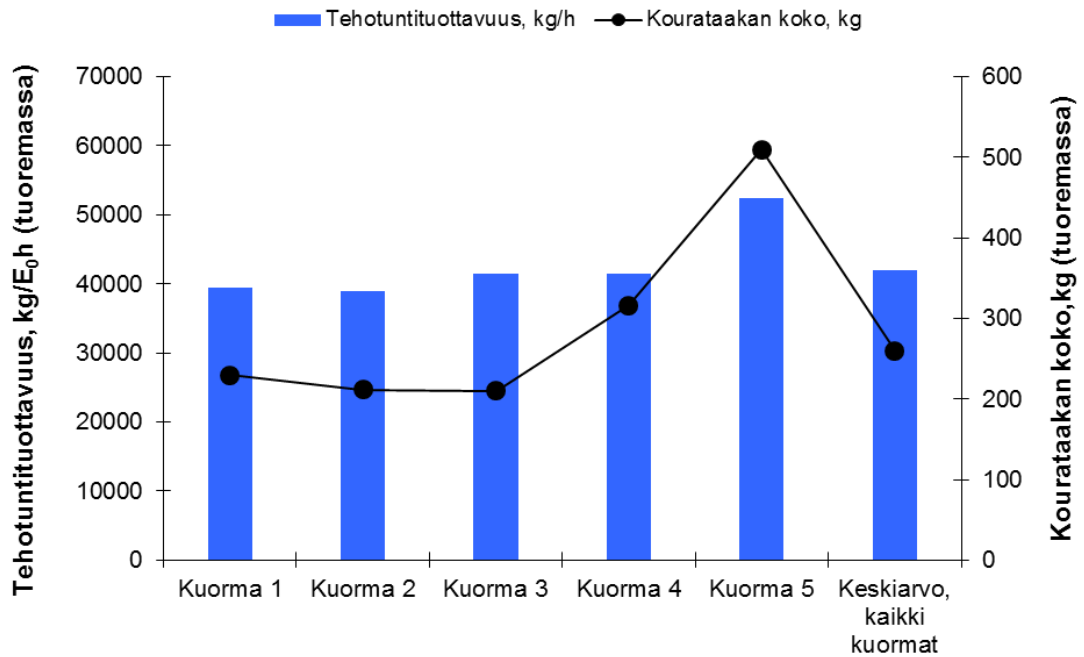


Kuva 12. Murskauksen päätyövaiheiden suhteelliset osuudet tehoajasta (E_0h).

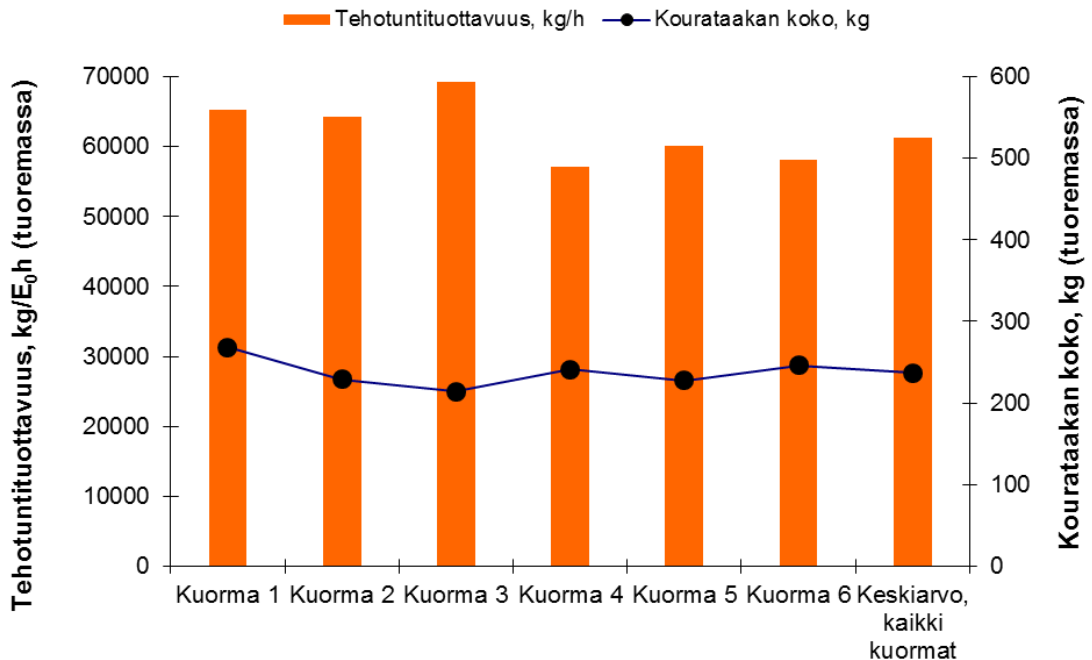
3.2 Murskauksen tuottavuus

Aikatutkimuksen tulosten vertailtavuuden ja sovellettavuuden vuoksi murskaustyön tehotuntituottavuus (E_0h) ilmaistiin kiinto- ja irtotilavuutta ($m^3/i-m^3$), tuore- ja kuivamassaa (kg) sekä metsähakkeen energiasisältöä (MWh) kohden. Tulosten laskenta perustui koottuun aikatutkimusaineistoon ja murskenäytteistä tehtyihin analyyseihin (Luku 3.3 & Taulukko 1). Aikatutkimusaineiston analyyseissä murskauksen tehotyöaikaan (E_0h) luettiin kouran vienti kasalle, taakkaan tarttumisen, kourataakan tuonti murskaimelle, kourataakan syöttö murskaimelle, syötön avustus, murskaus ja kasan järjestely (Kuva 12).

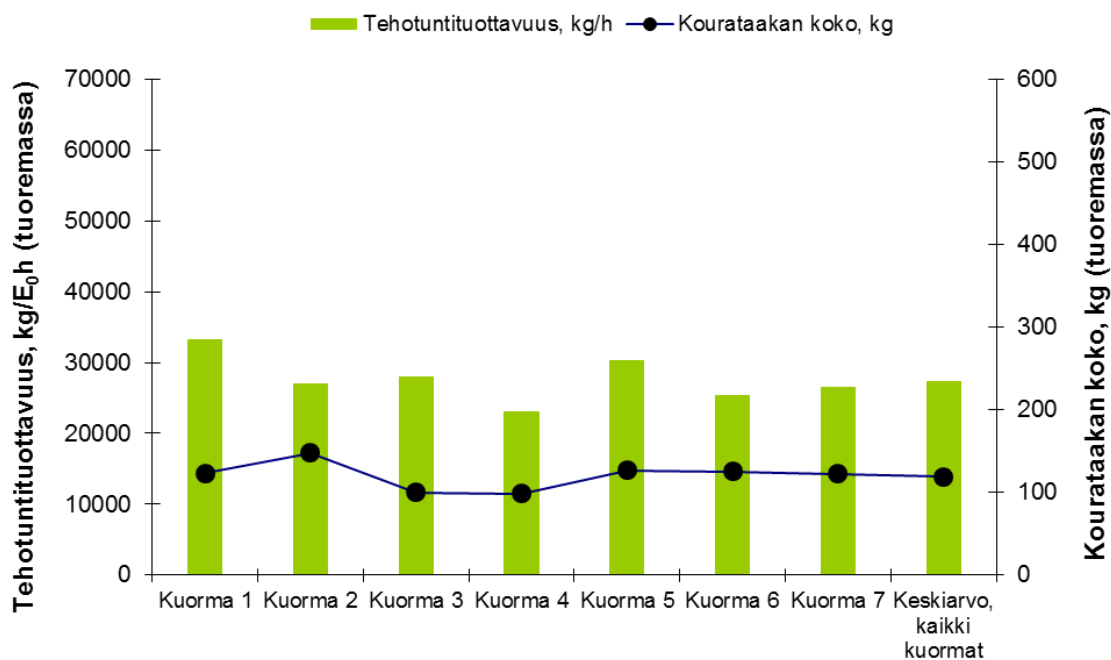
Tuoremassoina mitaten latvusmassan murskaustuottavuus oli vertailun korkein (Kuvat 13,14 & 15). Kokopuun murskauksen (Kuva 13) kuormakohtainen tehotuntituottavuus oli 38 942 – 52 365 kg ja tuottavuuden keskiarvo oli 41 897 kg/ E_0h . Kourataakan keskikoko oli 260 kg ja taakkakoko vaihteli 210 kg ja 510 kg välillä (Kuva 13). Latvusmassan murskauksessa tehotuntituottavuuden keskiarvo oli 61 312 kg/ E_0h (tuoremassa) ja kourataakan keskikoko oli 237 kg (Kuva 14). Kantojen murskauksessa tehotuntituottavuuden keskiarvo oli puolestaan 27 383 kg (tuoremassa) ja kourataakan keskikoko oli 119 kg (Kuva 15). Latvusmassan ja kantojen murskauksessa vaihtelu kuormakohtaisessa tuottavuudessa ja kourataakan koossa oli selvästi pienempää kuin kokopuun murskauksessa (Kuvat 13,14 & 15). Kokopuun murskauksessa kourataakan kokoon sekä tuottavuuteen epäilemättä vaikutti varastokasoissa havaitun metalliromun tarkkailu ja erillään pito.



Kuva 13. Kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus tuoremassaa kohden (kg/E₀h) sekä kourataakan koko (kg). Kokopuun keskikosteus 40 % ja kuivatuoretiheys 413 kg/m³ (Taulukko 1).



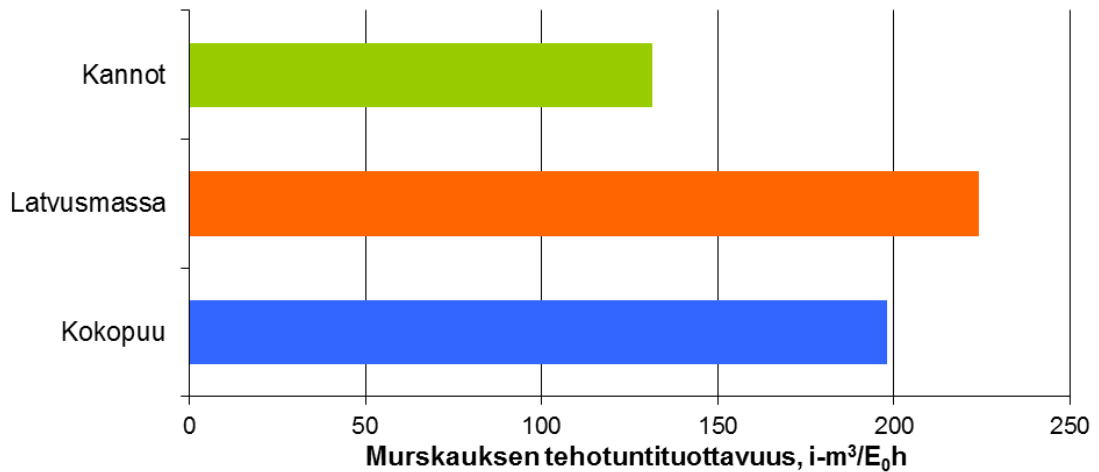
Kuva 14. Latvusmassan murskauksen tehotuntuottavuus tuoremassaa kohden (kg/E₀h) sekä kourataakan koko (kg). Latvusmassan keskikosteus 53 % ja kuivatuoretiheys 359 kg/m³ (Taulukko 1).



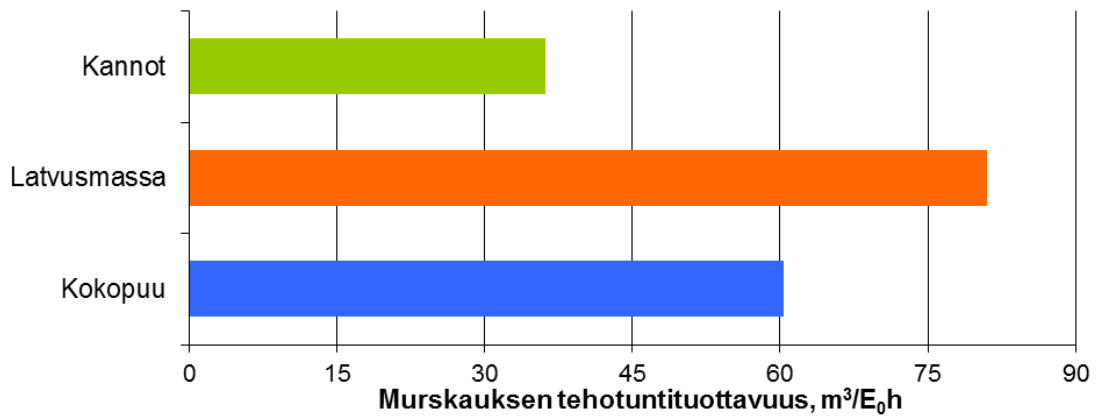
Kuva 15. Kantojen murskauksen tehotuntuottavuus tuoremassaa kohden (kg/E₀h) sekä kourataakan koko (kg). Kantojen keskikosteus 37 % ja kuivatuoretiheys 479 kg/m³ (Taulukko 1).

Murskeen irtotilavuuden perusteella (Kuva 16) latvusmassan murskauksen tehotuntuottavuus oli vertailun korkein (224 i-m³/E₀h). Kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus oli toiseksi korkein (198 i-m³/E₀h) ja vertailun pienin tuottavuus saatiin kantojen murskauksessa (131 i-m³/E₀h). Kiintokuutiometreinä mitaten latvusmassahakkeen tehotuntuottavuus oli 81 m³/E₀h (Kuva 17). Kokopuuhakkeella ja kannoilla murskauksen tehotuntuottavuus oli 60 m³/E₀h ja 36 m³/E₀h (Kuva 17). Kiintokuutiometrikohtaisessa vertailussa latvusmassan murskauksen tuottavuutta muihin verrattuna paransi se, että latvusmassalla muuntokertoimena käytetty kuivatuoretiheys (359 kg/m³) oli alempi kuin kokopuulla (413 kg/m³) tai kannoilla (479 kg/m³) (Taulukko 1).

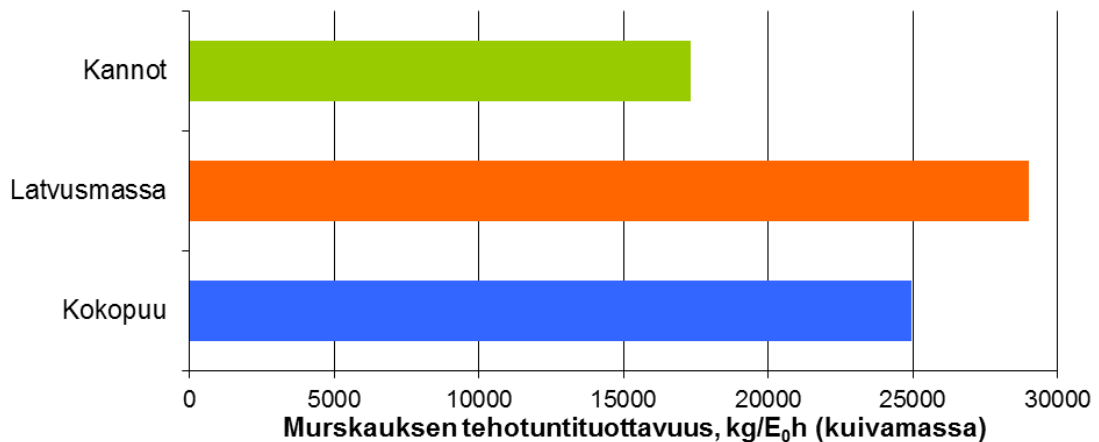
Kuivamassoina mitaten latvusmassan murskaustuottavuus oli 29 022 kg/E₀h, kokopuun 24 958 kg/E₀h ja kantojen 17 315 kg/E₀h (Kuva 18). Kuvassa 19 laskettiin murskaustyön tuottavuus polttomurskeen tehollista lämpöarvoa (MWh/E₀h) kohden. Laskennassa käytettiin Taulukon 1 parametreja kosteudesta (%) ja tehollisesta lämpöarvosta (MJ/kg). Kannoille laskettiin lisäksi lämpöarvo ja tuottavuus ns. kivennäismaasta puhtaalle kantopuulle Hakkilan (1978) tulosten mukaan (kuusi = 19,1 MJ/kg). Energiasisällön perusteella latvusmassan murskauksen tehotuntuottavuus oli 135 MWh/E₀h ja kokopuun 119 MWh/E₀h (Kuva 19). Kivennäismaasta puhtailla kannoilla tuottavuus oli 85 MWh/E₀h ja aikatutkimuksen mukaisilla kannoilla tehotuntuottavuus oli 72 MWh/E₀h (Kuva 19).



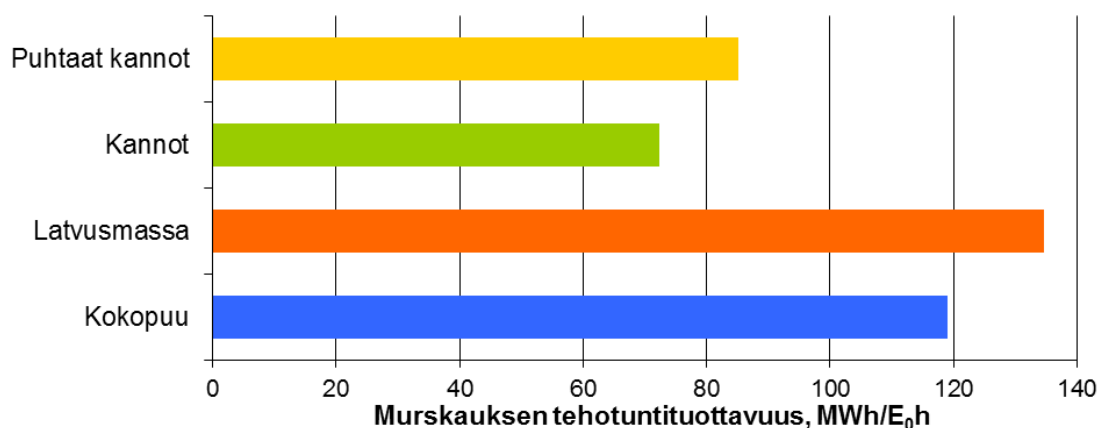
Kuva 16. Kantojen, latvusmassan ja kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus polttomurskeen irtotilavuutta ($i\text{-m}^3/E_0h$) kohden. Autokuorman tiiviys kannoille 28 %, latvusmassalle 30 % ja kokopuulle 36 % (Kuva 22).



Kuva 17. Kantojen, latvusmassan ja kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus kiintotilavuutta (m^3/E_0h) kohden.



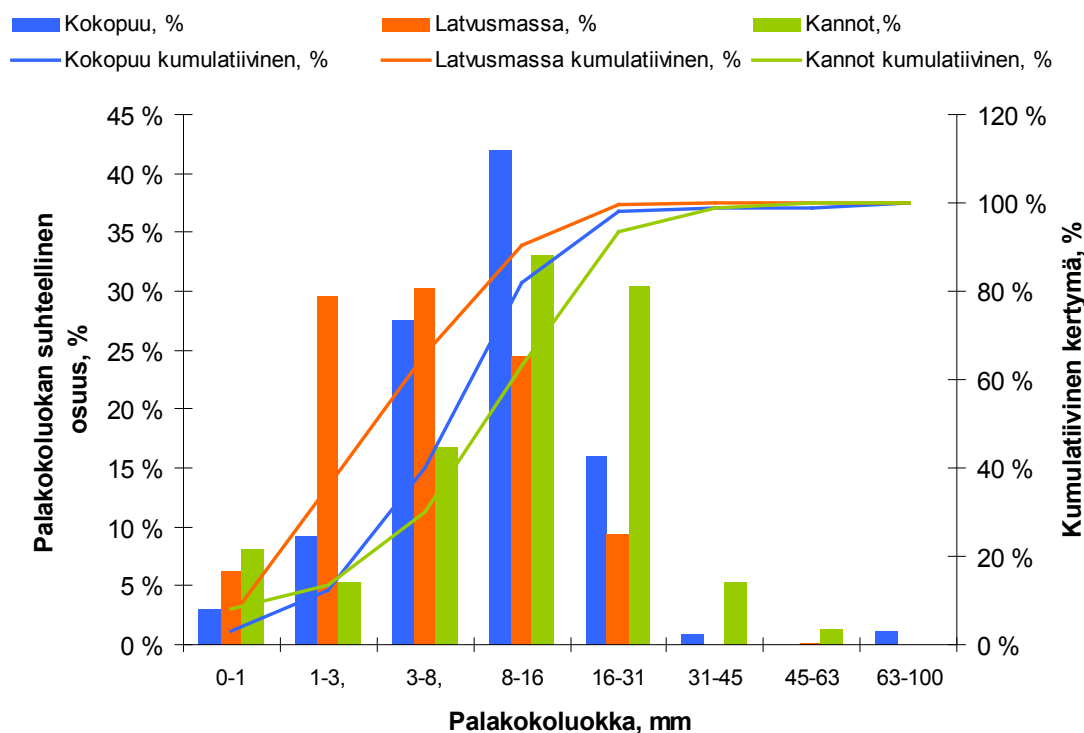
Kuva 18. Kantojen, latvusmassan ja kokopuun murskauksen tehotuntuottavuus kuivamassaa (kg/E_0h) kohden.



Kuva 19. Kantojen, latvusmassan ja kokopuun murskauksen tehotuntituottavuus polttomurskeen tehollista lämpöarvoa (MWh/E₀h) kohden, kun kosteus on tutkimuksessa todettu. Kannoilla tehollinen lämpöarvo on laskettu sekä tutkimuksessa todetulle tuhkapitoisuudelle että kivennäismaasta puhtaalle kantopuulle (Hakkila 1978).

3.3 Polttomurskeen ominaisuudet

Kokopuu-, latvusmassa- ja kantomurskeen kuiva-ainepainosta yli 90 % oli palakooltaan alle 31 mm ja karkeaa, palakooltaan yli 100 mm jaetta ei ollut yhdessäkään näytteessä (Kuva 20). Hienoaineksen, palakoko alle 3,15 mm osuus oli latvusmassamurskeella 36 %, kokopuulla 12 % ja kannoilla 13 % murskeen kuivapainosta (Kuva 20). Kokopuulla 86 % kuivamassasta ja kannoilla 80 % kuivamassasta oli palakokoluokassa 3,15–31,5 mm (Kuva 20). Latvusmassalla 84 % kuivamassasta oli palakokoluokassa 1–16 mm (Kuva 20).



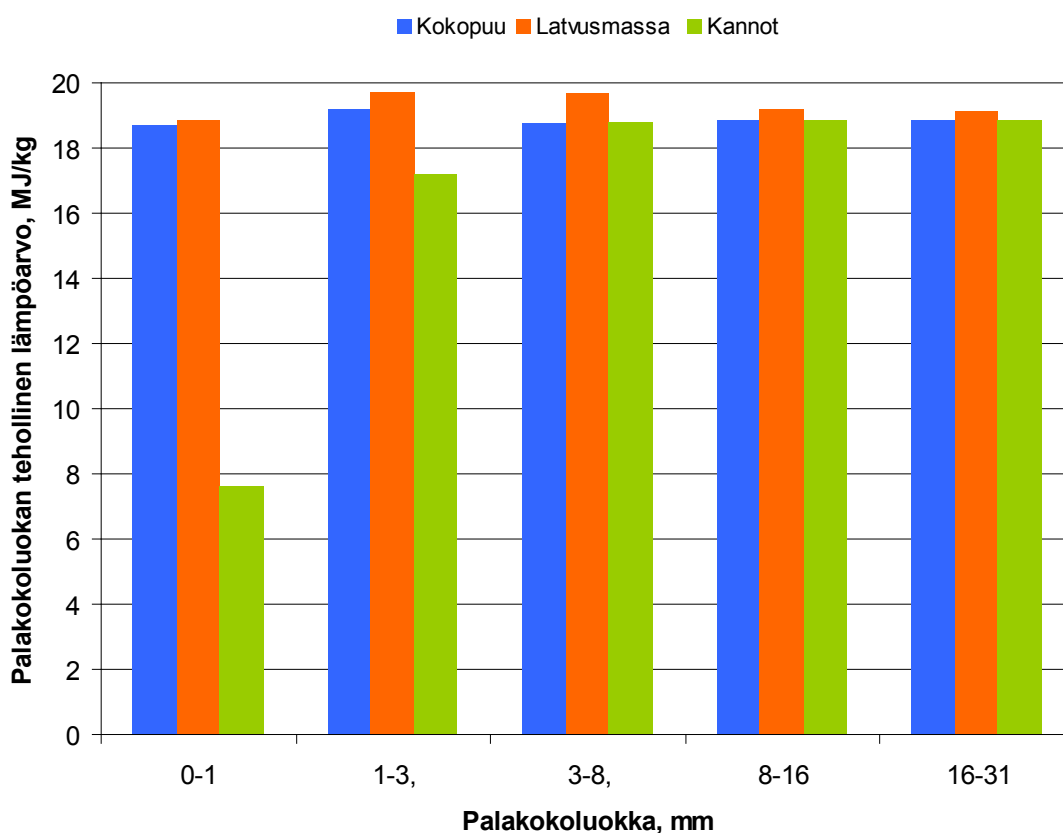
Kuva 20. Kokopuu-, latvusmassa- ja kantomurskeen palakokojakauma SFS-EN 15149-1 standardin mukaan.

Kokopuun kuivamassan tehollinen lämpöarvo oli 18,8 MJ/kg, latvusmassan 19,4 MJ/kg ja kantojen 16,4 MJ/kg (Taulukko 1). Murskeanalyysin perusteella kantojen kuiva-ainepitoisuus (%) ja kuivatuoretiheys (kg/m^3) olivat korkeimmat ja latvusmassalla em. arvot olivat vertailun pienimmät (Taulukko 1). Kantojen lämpöarvoa heikensi kantomurskeen 12,9 %:n tuhkapitoisuus, mikä oli selkeästi korkeampi kuin muilla murskelajeilla havaittu (Taulukko 1). Kantomurskeen lämpöarvo oli huono etenkin palakokoluokassa < 1 mm (7,6 MJ/kg), jossa huomattava osa hie-noaineksesta oli kivennäismaata (Kuva 21).

Kokopuu- latvusmassa- ja kantomurskekuormien tiiviys-% laskettiin jakamalla murskekuormien kiintotilavuutena laskettu kuormakoko murskekuormien irto- / kehystilavuudella (Kuva 22). Latvusmassalla murskekuorman tiiviys oli korkein, eli 36 %. Kokopuulla kuorman tiiviys oli 30 % ja kannoilla 28 % (Kuva 22).

Taulukko 1. Murskenäytteiden kosteuden, kuivatuoretiheyden, tehollisen lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden keskiarvot.

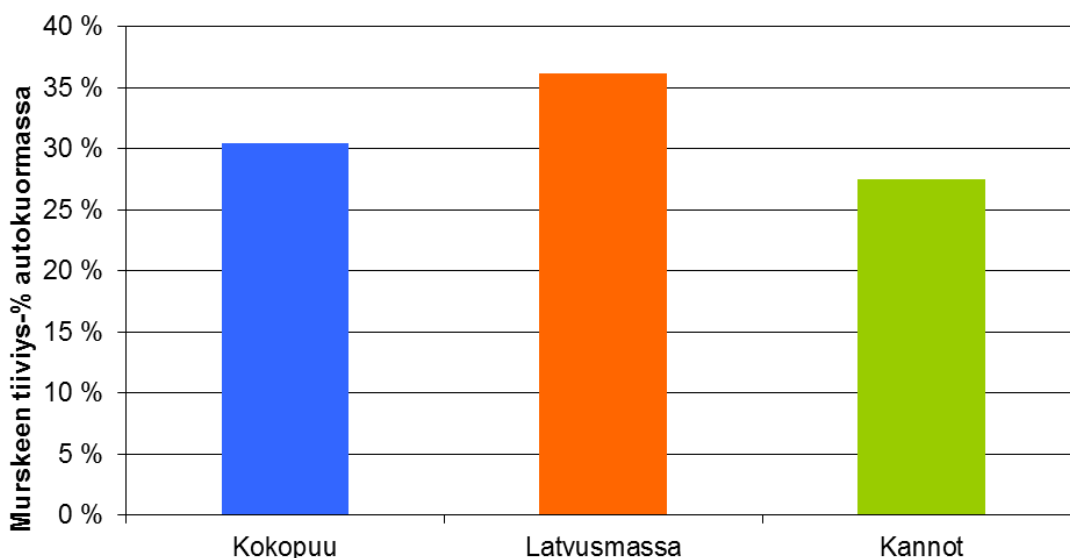
	MJ/kg	Kosteus-%	kg/m^3	Tuhka-%
Kokopuu	18,8	40	413	1,35
Latvusmassa	19,4	53	359	4,35
Kannot	16,4	37	479	12,90



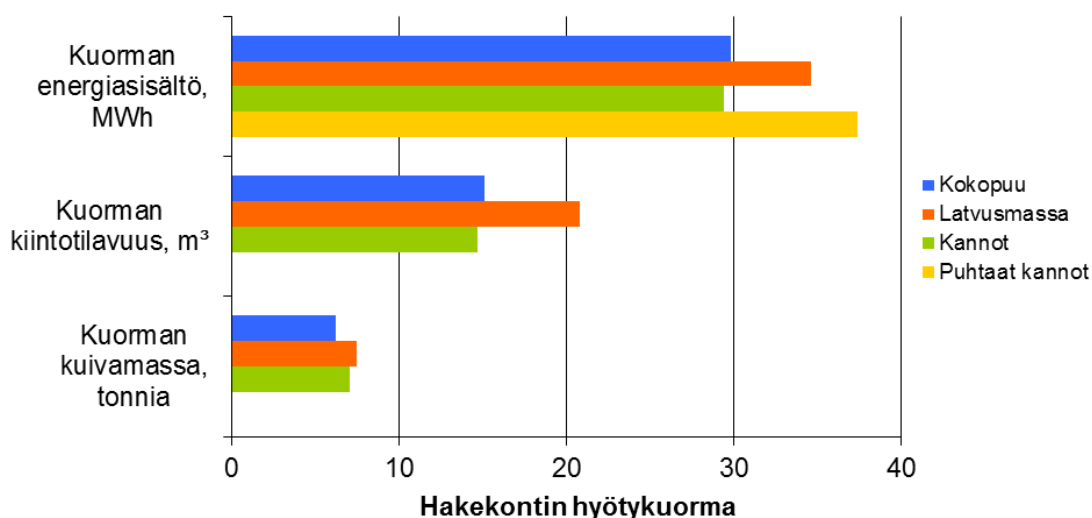
Kuva 21. Kokopuu-, latvusmassa- ja kantomurskeen tehollinen lämpöarvo (MJ/kg) eri palakokoluokissa.

Kuvassa 23 laskettiin kehystilavuudeltaan 50 i-m³ hakekontin hyötykuorma energiasisällön (MWh), kiintotilavuuden (m³) sekä kuivamassan (tonnia) mukaan. Kuormien kuivamassan laskenta perustui aikatutkimuksessa toteutuneisiin kuormapainoihin ja kosteuksiin. Kuormien energiasisällön (MWh) ja kiintotilavuuden (m³) laskenta perustui Taulukossa 1 esitettyihin lukuarvoihin. Kivennäismaasta puhtaalla kantopuulla kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo oli 19,1 MJ/kg (Hakkila 1978).

Kuivamassana mitaten hakekontin hyötykuorma kokopuumurskeella oli 6200 kg, latvusmassamurskeella 7 500 kg ja kantomurskeella 7 000 kg (Kuva 23). Kiintotilavuuden perusteella latvusmassamurskeen kuormakoko oli 21 m³ (Kuva 23). Kannoilla sekä kokopuulla murskeen kuormakoko 15 m³ (Kuva 23). Kivennäismaasta puhtaalla kantomurskeella hakekontin hyötykuorma oli 37 MWh, kun aikatutkimuksen kannoilla hyötykuorma jäi 29 MWh:iin (Kuva 23). Latvusmassamurskeella hyötykuorma oli 35 MWh ja kokopuumurskeella 30 MWh (Kuva 23).



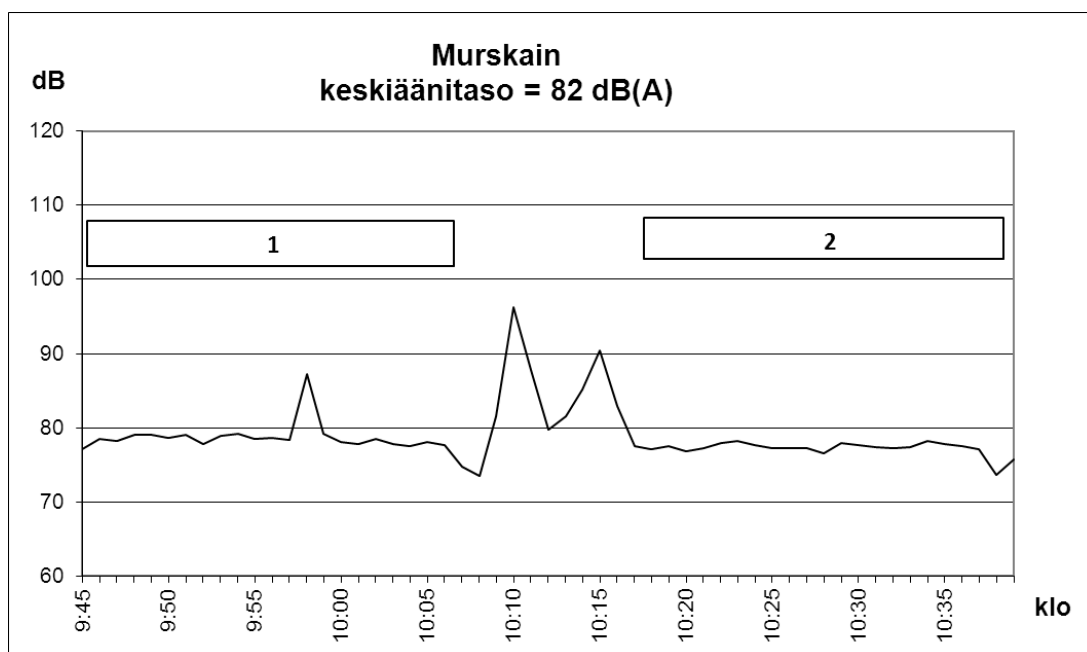
Kuva 22. Kanto-, latvusmassa- ja kokopuumurskeen tiiviyys-% autokuljetuskuormassa.



Kuva 23. Kanto-, latvusmassa- ja kokopuumurskeen hakekontin (50 m³) hyötykuorma energiasisällön (MWh), kiintotilavuuden (m³) ja kuivamassan (tonnia) mukaan.

3.4 Murskaustyön aiheuttama melu ja kuljettajaa kohdistuva tärinä

Kantojen murskauksessa kahden kuorman murskauksen aikana saatu melumittauksen tulos oli keskiäänitasona 82 dB (Kuva 24), mikä ylittää valtioneuvoston meluasetuksessa annetun alemman toiminta-arvon 80 dB(A). Kuvasta nähdään, että kuormaimen ohjaamon melutaso on noin 77–78 dB(A). Murskausjaksojen välissä melualtistus oli suurempi, mikä lisää kuljettajan kokonaismelualtistusta.



Kuva 24. Melutason vaihtelu yhden minuutin keskiäänitasoina kahden murskausjakson aikana.

Valtioneuvoston meluasetuksen 85/2006 mukaan melun raja-arvot ovat 8 tunnin nimellistä työpäivää vastaavana altistuksena seuraavat:

	L_{Aeq8h}	Huom.
Raja-arvo:	87 dB(A)	(kuulonsuojainten sisällä)
Ylempi toiminta-arvo:	85 dB(A)	(kuulonsuojainten ulkopuolella)
Alempi toiminta-arvo:	80 dB(A)	(kuulonsuojainten ulkopuolella)

Jos työntekijän työpäivän melualtistus ylittää alemman toiminta-arvon 80 dB(A), työntekijällä on oikeus saada työnantajalta henkilökohtaiset kuulonsuojaimet. Työntekijällä on myös oltava mahdollisuus käydä ennaltaehkäisevässä audiometrisessä kuulotestissä, mikäli melutilanteen mittaukset ja arviointi osoittavat terveydelle aiheutuvaa riskiä. Melualtistuksen ylittäessä ylemmän toiminta-arvon 85 dB(A) työnantajan on laadittava ja toteutettava meluntorjuntaohjelma, ja työntekijälle tulee velvollisuus kuulonsuojaimien käyttöön.

Kantojen murskaustyön aiheuttama melu 20 metrin päässä murskaimesta oli alusta-auton edestä mitattuna 78 dB(A), vasemmalta puolelta mitattuna 81 dB(A), takaa mitattuna 81 dB(A) ja oikealta etuviistosta (syöttöpöydän puolelta) mitattuna 82 dB(A).

Kuormaimen istuimen tärinä murskauksen aikana oli $0,5 \text{ m/s}^2$, mikä on samaa luokkaa kuin Valtioneuvoston tärinäasetuksessa 48/2005 määritelty kehotärinän toiminta-arvo $0,5 \text{ m/s}^2$. Käy-

tännön elämässä mittaustulos tarkoittaa sitä, että jos henkilö murskaa kantoja yli 8 tuntia päivässä, tärinäasetuksen toiminta-arvo ylittyy mutta normaalipituisina työpäivinä kehoon kohdistuva tärinä pysyy suositusten mukaisissa rajoissa.

4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

CBI 5800 murskaimen tuottavuus oli hyvä, kun tuloksia verrataan uusimpiin Suomessa tai Ruotsissa tehtyihin vastaavan tyyppisiin ja laajuisiin hakkuri- tai murskaintutkimuksiin (Karttunen ym. 2008, Föhr ym. 2010, Kärhä ym. 2010, Kärhä ym. 2011abcd, Laitila & Väätäinen 2011, Eliasson ym. 2012). Rumpuhakkureihin verrattuna murskaimella saatiin selvästi parempi tehotuntituottavuus latvusmassan tienvarsivarastomurskauksessa (Karttunen ym. 2008, Kärhä ym. 2011bd). Harvennuspään murskauksessa tuottavuus oli joko hieman pienempi tai samalla tasolla kuin rumpuhakkureilla (Karttunen ym. 2008, Föhr ym. 2010, Kärhä ym. 2010, Kärhä ym. 2011bd, Laitila & Väätäinen 2011).

Kantojen esimurskaukseen verrattuna (Kärhä 2011a) CBI 5800 murskaimen tehotuntituottavuus oli, hidaskäyntisen esimurskaimen seula-asetteesta riippuen, joko kolminkertainen (120 x 90 mm seula) tai samalla tasolla (500 x 320 mm seula). CBI 5800 murskaimella kantojen murskauksen tehotuntituottavuus oli $36 \text{ m}^3/\text{E}_0\text{h}$ (Kuva 17). Tiheällä seulalla (120 x 90 mm seula) tehdyn esimurskeen murskauksessa valmiiksi polttomurskeeksi hidaskäyntisen murskaimen tuottavuus oli $52 \text{ m}^3/\text{E}_0\text{h}$ ja karkean esimurskeen (500 x 320 mm seula) murskauksessa tuottavuus oli $33 \text{ m}^3/\text{E}_0\text{h}$ (Kärhä 2011a). Jos karkea esimurske (500 x 320 mm seula) murskattiin nopeakäyntisellä murskaimella, niin murskauksen tehotuntituottavuus nousi 61 m^3 :iin (Kärhä 2011a). Ras-kaisiin terminaali- tai käyttöpaikkamurskaimiin verrattuna CBI 5800 murskaimen tuottavuus jäi selvästi pienemmäksi kantojen murskauksessa (Kärhä ym. 2010, Kärhä ym. 2011c).

Ruotsissa Skogforsk tutki vastaavanlaista kuorma-autoalustaista CBI 5800 murskainta kantojen ja latvusmassan murskauksessa tienvarsivarastolla (Eliasson ym. 2012). Skogforskin tutkimuksessa latvusmassan murskauksen tehotuntituottavuus oli 23,8 kuivatonna/ E_0h ja kokopuun murskauksessa 16,8 kuivatonna/ E_0h , eli hieman vähemmän kuin tässä tutkimuksessa mitatut 29,0 ja 17,3 kuivatonnin tehotuntituottavuudet (Kuva 18). Skogforskin tutkimuksessa kantojen ylisuuri palakoko vaikeutti toisinaan kantojen syöttöä ja varsinaista murskausta. Liperin aikautkimustyömaalla kannot oli pilkottu huolellisesti, minkä vuoksi ne mahtuivat ongelmitta sisään murskaimen syöttöaukosta. Murskaustyön sujuvuuden kannalta oleellista on, että kannot on pilkottu kolmeen tai neljään kappaleeseen. Tässä tutkimuksessa ei mitattu polttoaineen kulutusta mutta Skogforskin mittausten mukaan latvusmassan murskauksen polttoaineen kulutus oli 3,05 litraa kuivatonna kohden ja kantojen murskauksessa 4,08 litraa (Eliasson ym. 2012).

CBI 5800 murskaimella polttomurskeen tiiviys autokuljetuskuormissa jäi alemmaksi kuin kokopuu- tai latvusmassahakekuormissa keskimäärin, koska hihnakuljetin poistokuljettimena ei tiivistä kuormaa niin hyvin kuten puhaltimella tai heittimellä varustettu hakkuri (Kärhä & Mutiainen 2011). Löyhistä murskekuormista on haittaa ennen muuta kuivien metsähakelajien autokuljetuksessa (esim. ranka-, runko- ja kokopuu-hake), koska silloin ei voida hyödyntää kuljetuskaluston täyttä kantavuutta kuormatilan kehysmittojen puitteissa. Kosteilla metsähakelajeilla (esim. latvusmassahake) tätä ongelmaa ei ole nykyisillä painorajoituksilla (60 tonnia), vaan kuormakokoa yleensä rajoittaa kehysmittojen sijasta autokuljetuksen enimmäispainorajat. Tässä tutkimuksessa saatuja tiiviyslukuja ei tule käyttää mittausterusteena vaan tuloksia tulee käsitellä suuntaa antavina arvoina, koska koottu aineisto oli pieni, kuormia ei tasattu kuormatilan lai-

toja myöten murskaustyön päätteeksi, murskeen tiivistymistä ajonaikana ei arvioitu ja yhtä kuormaa lukuun ottamatta kaikki kuormat täytettiin pelkästään perästäpäin. Luotettavampi käsitys murskekuormien tiiviydestä saadaan laajan ja pitkäkestoisen seurantatutkimuksen perusteella.

Metsätehon Jenz HEM 581 DQ hakkurista tekemässä aikatutkimuksessa latvusmassahakkeen tiiviyys oli 45–58 % ja pienpuuhakekuormissa se oli 42–48 % (Kärhä ym. 2011b). Uusvaaran ja Verkasalon (1987) tutkimuksessa Lokomo MS 9 vasaramurskaimella tuotetun ja hihnakuuljettimella kuormatun latvusmassamurskeen tiiviyys oli keskimäärin 38,3 % (vaihteluväli 35,8–46,9 %). Ala-Fossi ym. (2007) tutkimuksessa terminaalista toimitettujen kantomurskekuormien tiiviyys oli 31–34 %. Kantojen osalta tienvarsimurskauksella saatiin huomattava lisäys hyötykuormaan, koska ns. energiapuuautoilla kuljetettujen kantojen kuorman tiiviyys on ollut 18,5–25 % (Ranta & Rinne 2006, Ala-Fossi ym. 2007, Kärhä ym. 2011c). Lisäksi kuormaustyö tehostui tienvarsimurskauksen ansiosta, koska kantopalojen autoon kuormauksen tehoajanmenekiksi on saatu 19,7 tuoretonnia/E_{0h} puutavarakuormaimella (Salonen 2008, Palander ym. 2011), kun tässä tutkimuksessa kantojen murskauksen ja hakeautoon kuormauksen tehotuntituottavuus oli 27,4 tuoretonnia/E_{0h} (Kuva 15) eli 17,3 kuivatonna/E_{0h} (Kuva 18).

Latvusmassamurskeen hienoaineksen, joka koostuu neulasista ja murenevasta oksankuoresta, osuus oli yli 30 % kuivapainosta (Kuva 20). Hienoaineksen suuri osuus latvusmassahakkeen kuivamassasta on todettu myös aiemmissa tutkimuksissa (Kärhä ym. 2010, Kärhä ym. 2011bd). Kantomurskeen korkean tuhkapitoisuuden (12,9 %) vuoksi kantomurskeen tehollinen lämpöarvo oli kuivamassaa kohden (16,4 MJ/kg) selvästi alempi kuin puhtaalla (19,1 MJ/kg) kantopuulla (Hakkila 1978).

Laurilan ja Lauhasen (2010) tutkimuksessa kuusen kantopuun tehollinen lämpöarvo kolmen vuoden varastoinnin jälkeen oli 18,9 MJ/kg. Anerudin ja Jirjksen (2011) mukaan tuoreiden kuusen kantojen tehollinen lämpöarvo kuiva-aineessa oli eri nostomenetelmillä 17,8–18,5 MJ/kg ja reilun vuoden varastoinnin päätyttyä se oli 18,8 MJ/kg. Jahkosen ym. (2012) tutkimuksessa kantopuun tehollinen lämpöarvon oli 18,7 MJ/kg. Huolellisen nostotyön ja varastointiajan ohella kantopuun käsittelykerroilla oletettavasti on vaikutus kantomurskeen tuhkapitoisuuteen ja lämpöarvoon. Anerudin ja Jirjksen (2010) sekä Jahkosen (2012) tutkimuksessa kantopuu ajettiin murskattavaksi terminaaliin, jolloin puuaines altistui kuormaus- ja purkutyön kolhaisuille sekä kuljetuksen aiheuttamalle puhdistavalle tärinälle huomattavasti enemmän kuin jos se olisi murskattu suoraan tienvarsivarastolla. Jos kantojen tienvarsimurskausta verrataan tuhkapitoisuuden osalta tienvarsivarastolla tapahtuvaan esimurskaukseen, niin lopputuotteen laadussa ei todennäköisesti ole suuria eroja, ellei esimurskauksen yhteyteen ole liitetty hienoaineksen seulontaa ja poistoa (vrt. Anerud 2012).

Tulosten perusteella CBI 5800 murskain soveltuu hyvin latvusmassan, pilkottujen kantojen, harvennuspuun sekä epäpuhtauksia sisältävän puuaineksen murskaukseen tienvarsivarastolla. Tehokkaimmillaan kone oli latvusmassan murskauksessa. Käytännön toiminnassa, taitavan kuljettajan ja tehokkaan koneen ohella, myös toimintaolosuhteiden sekä toimitus- ja vastaanottologistiikan on oltava kunnossa, ettei tehokasta työaikaa hukkaannu varastokasojen tai -paikkojen välisiin siirtymisiin, konekeskeytyksiin tai hakeautojen odotteluun. Asikaisen (2010) simulointitutkimuksessa havaittiin, että jo 20 kilometrin kaukokuljetusmatkalla kustannustehokas toimitusketju vaati kahden puoliperävaunullisen hakeauton käyttöä kantojen tienvarsimurskauksessa. Kuljetusmatkan ollessa yli 40 kilometriä käyttöön tuli ottaa kolmas hakeauto ja yli 100 kilometrin toimitusmatka edellytti jo neljän hakeauton kuljetuskapasiteettia.

Lähteet

- Ala-Fossi, A., Ranta, T., Vartiamaäki, T., Laitila, J. & Jäppinen, E. 2007. Large-scale forest fuel supply chain based on stumps and terminals. In: Proceedings of the International Conference held in Berlin, Germany 7–11 May 2007. 15th European Biomass Conference & Exhibition – From Research to Market Deployment. ETA-Renewable Energies: 140–145.
- Anerud, E. 2012. Stumps as Fuel – the influence of handling method on fuel quality. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Acta Universitatis agriculturae Sueciae 2012:85. 59 s.
- Anerud, E. & Jirjis, R. 2011. Fuel quality of Norway spruce stumps – influence of harvesting technique and storage method. Scandinavian Journal of Forest Research 26: 257–266.
- Asikainen, A. 2010. Simulation of stump crushing and truck transport of chips. Scandinavian Journal of Forest Research 25: 245–250.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. ja Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Eliasson, L., Granlund, P., von Hofsten, H. & Björheden, R. 2012. Studie av en lastbilsmonterad kross – CBI 5800. Arbetsrapport Från Skogforsk nr. 775–2012. 16 s.
- Föhr, J., Karttunen, K. & Ranta, T. 2010. Energiapienpuun tienvarsihaketusketju. Julkaisussa: Energiapuuta Etelä-Savosta. Karttunen, K., Föhr, J. & Ranta, T. 2010. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. LUT Energia – Tutkimusraportti 7: 71–82.
- Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Folia Forestalia 342. 38 s.
- Jahkonen, M., Jouhiaho, A., Lindblad, J., Rieppo, K. & Mutikainen, A. 2012. Kantoharalla ja kantoharvesterilla korjatun kantuun lämpöarvo ja tuhkapitoisuus. Metlan työraportteja 239. 20 s.
- Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. & Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tutkimusraportti ENTE B–177. 58 s.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Hautala, A. 2010. Vermeer HG6000 terminaalihaketuksessa ja -murskauksessa. Metsätehon tulosalvosarja 15/2010. 37 s.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011a. Crambo 5000 kantojen tienvarsimurskauksessa. Metsätehon tulosalvosarja 4/2011. 48 s.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011b. Jenz HEM 581 DQ hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 5/2011. 49 s.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Hautala, A. 2011c. Saalasti Murska 1224 HF käyttöpaikkamurskauksessa. Metsätehon tulosalvosarja 7/2011. 61 s.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. 2011d. HEINOLA 1310 ES hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 9/2011. 33 s.
- Kärhä, K. & Mutikainen, A. 2011. Jenz HEM 820 DL runkopuun terminaalihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 13/2011. 26 s.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketuustuottavuus. Metsätieteen aikakauskirja 2/2011: 107–126.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2011. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT Tiedotteita 2564. 143 s.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. 2010. Moisture Content of Norway Spruce Stump Wood at Clear Cutting Areas and Roadside Storage Sites. Silva Fennica 44(3): 427–434.
- Nuutinen, Y., Väätäinen, K., Heinonen, J., Asikainen, A. & Röser, D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. Silva Fennica 42(1): 63–72.
- Palander, T., Salonen, J. & Ovaskainen, H. 2011. Kanto- ja juuripuun kaukokuljetuksen kustannusrakenne. Tieteen tori. Metsätieteen aikakauskirja 4/2011: 294–299.
- Ranta, T. & Rinne, S. 2006. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. Biomass and Bioenergy 30(3): 231–237.
- Rinne, S. 1998. Uudistushakkuutähteet suoraan laitokselle –ketju. Bioenergian tutkimusohjelma Y 120. 37 s.

- Rinne, S. 2010. Energiapuun haketuksen ja murskatuksen kustannukset. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta, energiatekniikan koulutusohjelma. 102 s.
- Salonen, J. 2008. Kanto- ja juuripuun kaukokuljetuksen kustannusrakenne. Metsäteknologian pro gradu. Itä-Suomen yliopisto. 40 s.
- Spinelli, R., Cavallo, E., Facello, A., Magagnotti, N., Nati, C. & Paletto, G. 2012. Performance and energy efficiency of alternative comminution principles: Chipping versus grinding. *Scandinavian Journal of Forest Research* (27:4) 393–400.
- Strandstöm, M. 2012. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2011. *Metsätehon tuloskalvosarja* 4/2012. 24 s.
- Uusvaara, O. & Verkasalo, E. 1987. Metsähakkeen tiiviys ja muita teknisiä ominaisuuksia. *Folia Forestalia* 683. 53 s.
- Ylitalo, E. 2012. Puun energiakäyttö 2011. *Metsätilastotiedote* 16/2012. 7 s.