

Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät

Jani Heikkilä, Juha Laitila, Vesa Tantt, Jari Lindblad, Matti Sirén,
Antti Asikainen, Karri Pasanen ja Kari T. Korhonen



PUUENERGIA

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisutoiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

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

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

Toimitus

Unioninkatu 40 A
00170 Helsinki
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
Unioninkatu 40 A
00170 Helsinki
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi>

Tekijät Heikkilä, Jani, Laitila, Juha, Tanttu, Vesa, Lindblad, Jari, Sirén, Matti, Asikainen, Antti, Pasanen, Karri & Korhonen, Kari T.			
Nimeke Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät			
Vuosi 2005	Sivumäärä 56	ISBN 951-40-1964-4	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuun tutkimuskeskus/ - / 7152 Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät			
Hyväksynyt Jari Parviainen, tutkimuskeskuksen johtaja, 29.4.2005			
Tiivistelmä <p>Raportissa selvitettiin karsitun energiapuun eli rangan korjuuvaihtoehtoja ja kustannustekijöitä. Raportti koostuu osatutkimuksista, joista yhdessä verrattiin rangan ja kokopuun korjuun tuottavuutta, kustannuksia ja korjuujälkeä otettaessa energiapuuta talteen erilliskorjuuna joukkokäsittelyä hyödyntävillä hakkuulaitteilla. Rangan hakkuuta ainespuun hakkuun yhteydessä tutkittiin toisessa osatutkimuksessa. Kolmas osatutkimus selvitti rangan saatavuutta ja käyttöpaikkahintaa erilaisilla rajoitteilla eri osissa maata. Myös rangan hakkuukonemittausta tutkittiin joukkokäsittelyä hyödyntävässä hakkuussa.</p> <p>Erilliskorjuussa rangan hakkuun tuottavuus oli 10–40 % matalampi kuin kokopuun hakkuussa. Rangan metsäkuljetuksen tuottavuus oli 10–20 % korkeampi kuin kokopuulla. Korjuukustannukset tutkituissa leimikoissa olivat 29,3 €/m³ rangalla ja 23,8 €/m³ kokopuulla. Kustannusero johtui suurelta osin hakkuun tuottavuuserosta, joka aiheutui hakkuukertymän pienenemisestä karsittaessa puut.</p> <p>Integroidussa korjuussa ainespuiden latvakappaleiden karsinta energiapuuksi oli tehokasta, sillä tuottavuus oli lähes kolminkertainen verrattuna ainespuukokoa pienempien puiden hakkuuseen. Eroa selittää se, että latvakappaleiden hakkuusta energiapuuksi aiheutui verraten vähän lisätyötä. Ainespuuhakkuun yhteydessä korjattavan karsitun energiapuun korjuukustannukset olivat tutkituissa leimikoissa 32,6 €/m³.</p> <p>Alueellisessa tarkastelussa rankana korjuu nosti korjuukustannuksia 17–25 % ja pienensi kertymää kokopuuna korjuuseen verrattuna 42–46 %. Metsäenergiapotentialiaali lisääntyy, jos energiapuuta voidaan korjata rankana alueilta, joilla korjuu kokopuuna ei ole mm. ravinnehävikistä aiheutuvan puuston kasvutappioriskin vuoksi mahdollista.</p> <p>Rangan mittaustutkimuksessa selvitettiin puunippujen kehystilavuuteen ja kiintotilavuusprosenttiin perustuvaa mittausta. Sekä kehystilavuuden että kiintotilavuusprosentin mittaukseen liittyi epätarkkuutta, mutta tutkitun menetelmän eräkohtainen tarkkuus oli suhteellisen hyvällä tasolla eräkoon ollessa yli 10 m³. Menetelmän käyttöönotto vaatii kuitenkin lisää tutkimuksia.</p> <p>Rangalla korjuukustannukset ovat korkeammat kuin kokopuulla. Rangan etuja ovat raaka-aineen korkea laatu ja soveltuvuus pienkattiloissa poltettavan hakkeen ja pilkkeen valmistukseen. Rankana korjuu ei aiheuta ravinnetappioita ja korjuu on täten mahdollista myös karuulta kivennäismailta ja turvemailta, mikä kasvattaa hyödynnettävissä olevaa energiapuupotentiaalia. Pienirunkoisilla kohteilla karsinnan aiheuttama kustannusten nousu saattaa kuitenkin olla hyötyjä suurempi. Kuitupuulle sovellettavat pienet vähimmäislatvaläpimitat heikentävät rangan korjuun kannattavuutta integroidussa korjuussa.</p>			
Asiasanat energiapuu, karsittu energiapuu, ranka, nuoret metsät, puunkorjuu			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2005/mwp010.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Jani Heikkilä, Metla, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti jani.heikkila@metla.fi			
Muita tietoja Raportin taitto: Maija Heino			

Sisällys

Esipuhe	6
1 Johdanto	7
1.1 Tutkimuksen tausta	7
1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	8
2 Rangan ja kokopuun erilliskorjuun vertailu.....	9
2.1 Tutkitut laitteet ja hakkuumenetelmät.....	9
2.2 Tutkimusaineisto	11
2.3 Tutkimusmenetelmät.....	12
2.4 Tulokset.....	14
2.4.1 Hakkuun työvaiheet ja joukkokäsittelyn hyödyntäminen.....	14
2.4.2 Hakkuun ajanmenekki- ja tuottavuusmallit	16
2.4.3 Metsäkuljetuksen ajanmenekki ja tuottavuus	18
2.4.4 Rangan ja kokopuun korjuun kustannukset.....	19
2.4.5 Korjuujälki.....	20
3 Karsitun aines- ja energiapuun integroitu korjuu	21
3.1 Hakkuulaite ja -menetelmä.....	21
3.2 Aikatutkimusaineisto ja -menetelmä	23
3.3 Tulokset.....	24
3.3.1 Hakkuun ajanmenekki	24
3.3.2 Hakkuun tuottavuus	25
3.3.3 Korjuukustannukset	26
4 Karsitun energiapuun saatavuus maan eri osissa.....	27
4.1 Karsitun energiapuun kertymien laskentaperusteet.....	27
4.2 Karsitun energiapuun pölkyttäminen eri katkaisuläpimitoilla	29
4.3 Karsitun energiapuun kertymät maan eri osissa.....	31
5 Työvaiheiden osuus rankahakkeen käyttöpaikkahinnasta eri haketusmenetelmillä.....	34
5.1 Laskentaperusteet.....	36
5.2 Tulokset.....	36
6 Olosuhdetekijöiden vaikutus karsitun energiapuun korjuukustannuksiin	38
6.1 Korjuukustannukset maan eri osissa	38
6.2 Latvaläpimitan vaikutus tuotantokustannuksiin.....	40
6.3 Kokopuuna ja rankana korjuun vaikutus tuotantokustannuksiin eri leimikonvalintakriteereillä	41
6.3.1 Laskentaperusteet	41
6.3.2 Hakkuutavan ja rajoitteiden vaikutus kertymäpotentiaaliin	41

6.3.3 Hakkuutavan ja leimikkorajoitteiden vaikutus tuotantokustannuksiin	43
7 Karsitun energiapuun mittaus joukkokäsittelyharvesterilla.....	46
7.1 Tutkittava mittausmenetelmä	46
7.2 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	47
7.3 Tulokset ja johtopäätökset.....	48
7.3.1 Nippukohtaisten kiintotilavuusprosenttien määrittäminen	48
7.3.2 Eräkohtainen mittaustarkkuus	50
7.3.3 Mittausmenetelmän soveltamismahdollisuudet.....	51
8 Johtopäätökset.....	52
Kirjallisuus	55

Esipuhe

Tämä on ”Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät” hankkeen loppuraportti. Hanke kuului Tekesin Puuenergian teknologiaohjelman Puupolttoaineiden pientuotannon ja käytön panostusalueeseen. Hanke alkoi 1.1.2004 ja päättyi 31.5.2005. Hankkeen rahoittajina toimivat Tekes, Komatsu Forest Oy, Sampo Rosenlew Oy sekä Waratah-OM Oy. Metsän-tutkimuslaitos ja Työtehoseura vastasivat tutkimuksen toteutuksesta ja raportoinnista.

Metlan Vantaan tutkimuskeskus vastasi joukkokäsittelyyn perustuvan karsitun energiapuun korjuun ja kokopuuna korjuun vertailututkimuksesta. Työtehoseura tutki ainespuun korjuun yhteyteen integroitua karsitun energiapuun korjuuta. Integroidussa aines- ja energiapuun-korjuussa hakkuutapa oli yksinpuin käsittely. Metlan Joensuun tutkimuskeskus vastasi rankapuun saatavuuden ja kustannusrakenteen selvittämisestä sekä tutki rankapuun mittausta.

Yhteistyökumppaneina hankkeeseen osallistuneitten yritysten ohella toimivat Metsäliitto Osuuskunta ja UPM Metsä, joiden työmailla tutkimukset tehtiin. Koneyrittäjien ja kuljettajien panos hankkeen aikana oli ensiarvoisen tärkeä ja yhteistyö mutkatonta. Maastoaineiston keruussa tekivät arvokasta työtä Erkki ja Veijo Salo, Jukka Lehtimäki, Juha Metros, Yrjö Nuutinen sekä Arto Mutikainen. Mikko Kukkola antoi asiantuntevia neuvoja projektin aikana. Pentti Hakkila antoi raportin käsikirjoituksesta hyvää ja huomioon otettua palautetta. Kiitokset kaikille hankkeen onnistumiseen vaikuttaneille henkilöille!

Tekijät

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Harvennuksilta koneellisesti korjattava energiapuuta otetaan nykyään pääosin talteen kokopuuna. Pienpuun korjuu oksineen paisuttaa energiapuukertymää, nostaa korjuutyön tuottavuutta ja alentaa korjuukustannuksia verrattuna tilanteeseen, jossa pienpuu otettaisiin talteen karsittuna. Karsitun energiapuun eli rangan korjuulla on kuitenkin omat hyvät puolensa. Rangasta tehty hake sopii kosteutensa ja palakokojakaumansa puolesta poltettavaksi myös pienissä kattiloissa ja suuremmissakin kattiloissa rankahakkeella voidaan tasoittaa kokopuu- ja hakkuutähdehakkeen laadunvaihtelua. Rankaa voidaan käyttää myös pilkkeiden valmistukseen. Rangan korjuussa ravinnehävikki on merkittävästi pienempi kuin kokopuun korjuussa, koska suurin osa puiden ravinteista on sitoutuneena lehtiin, neulasiin ja oksiin

Energiakäyttöön ohjautuvan pienpuun määrä ja myös tuotantokustannukset riippuvat vahvasti siitä, millaisia vähimmäismittoja metsäteollisuus soveltaa kuitupuulle. Pienpuuhakkeen tuotannon rajoitteina ovat kalliit tuotantokustannukset moniin kilpaileviin puupolttoaineisiin nähden. Harvennusenergian energiapuun korjuukustannuksia nostaa pieniläpimittaisen puun korkeat hakkuukustannukset, joita esim. päätehakkuiden hakkuutähteestä valmistetulla hakkeella ei ole. Pienkattiloissa poltettavan hakkeen ja pilkkeiden raaka-aineena karsittu pienpuu säilyttää kuitenkin asemansa raaka-aineominaisuuksiensa ansiosta jatkossakin edellyttäen, että sen tuotantoketju on riittävän kustannustehokas.

Metsähakkeen, eli hakkuutähde- ja pienpuuhakkeen sekä kantomurskeen, käytön kasvu on ollut viime vuosina nopeaa ja vuoden 2010 tavoitteena on saavuttaa noin viiden miljoonan kuutiometriä kuutiometriä käyttöä (Uusiutuvan energian... 2003). Vuonna 2004 energialaitoksissa poltettiin 2,3 miljoonaa kuutiometriä metsähaketta. Vuodesta 2000 vuoteen 2004 metsähakkeen käyttö lähes kolminkertaistui. Metsähakkeen raaka-ainelähteistä hakkuutähteiden ja kantojen käyttö on kasvanut eniten. Aikavälillä 2000–2004 karsimattoman pienpuun käyttö lisääntyi 87 % ja karsitun rangan käyttö 26 %. Vuonna 2004 karsittua rankaa käytettiin 106 000 kuutiometriä (Ylitalo 2005).

Vuonna 2001 pientalokiinteistöissä poltettiin 400 000 kuutiometriä metsähaketta (Ylitalo 2004). Solmion (2002) esittämien maatalojen hakelämmitystä koskevien tietojen perusteella voidaan arvioida, että pientalokiinteistöjen käyttämästä metsähakkeesta noin 300 000 kuutiometriä oli valmistettu rangasta. Pientalokiinteistöt käyttivät lämmityskaudella 2000/2001 yhteensä 6,1 miljoonaa kuutiometriä polttopuuta, josta 5,1 miljoonaa kuutiometriä oli raakapuuta ja 1,0 miljoonaa kuutiometriä jätepuuta (Sevola ym. 2003). Sevolan ym. (2003) esittämien hankintalähteiden perusteella voidaan päätellä, että yli puolet pientalokiinteistöjen polttamasta raakapuusta oli karsitusta, pieniläpimittaisesta puusta valmistettua pilkettä. Työtehoseuran vuonna 2002 tekemän tutkimuksen mukaan pilkekauppiat valmistivat 19 % tekemistään pilkkeistä rankapuusta (Seppänen ja Kärhä 2003).

Karsitusta energiapuusta eli rangasta valmistetun pilkkeen ja metsähakkeen käyttö on siis ollut karkeasti arvioiden noin kolmen miljoonan kuutiometrin tasolla vuodessa. Suurin osa varsinkin pientalokiinteistöissä käytetystä rangasta lienee valmistettu omatoimisesti moottorisaha-hakkuuna. Metsähakkeen käytön ja lämpöyrittäjyyden lisääntyessä rangan koneelliselle korjuulle on kuitenkin kasvava tarve.

Energiapuuta voidaan korjata erilliskorjuuna tai liittämällä se osaksi ainespuun korjuuta. Erilliskorjuussa kohteelta otetaan talteen ainoastaan energiapuuta. Aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa puutavaralajit korjataan yhtäaikaaisesti. Energiapuun eli ainespuurunkojen latvakappaleet sekä ainespuukokoa pienemmät puut erotetaan ainespuusta jo hakkuuvaiheessa valmistamalla ositteet omiin kasoihinsa, koska ositteiden metsäkuljetus on sujuvampaa omina kuorminaan. Energiapuun otetaan talteen erilliskorjuuna yleensä silloin, kun ainespuun kertymä on pieni. Pystykaupoissa alle 20 kuutiometrin hehtaarikohtaisella ainespuukertymällä kuitu- ja energiapuuta ei yleensä kannata erotella omiksi tavaralajeikseen.

Hakkuun tuottavuuteen vaikuttavat korjuuolosuhteiden lisäksi kuljettajan ammattitaito ja työskentelytekniikka. Hakkuun tuottavuutta voidaan nostaa keräämällä hakkuulaitteeseen kaatovaiheessa useita puita samanaikaisesti ja karsimalla ja katkomalla ne yhtenä käsittely-yksikkönä. Joukkokäsittelystä on saatu lupaavia tuloksia ainespuuhakkuussa (mm. Bergkvist 2003), ja menetelmää hyödynnetään myös kaato-kasauslaitteilla tehtävässä kokopuukorjuussa. Puutavaran hakkuukonemittaus on ongelmallista käsiteltäessä useita puita yhtä aikaa. Tämä on hidastanut joukkokäsittelyn käyttöönottoa ainespuun korjuussa. Energiapuun mittausmenetelmät ovat vakiintumattomia eikä maa- ja metsätalousministeriön vahvistamia mittausmenetelmiä ole käytössä. Hakkuun yhteydessä tapahtuva mittaus on kustannustehokasta ja sopii hyvin energiapuun toimituslogistiikkaan. Siksi hakkuukonemittauksen käyttöönotolle myös energiapuun korjuussa on selvää tarvetta.

Energiapuupotentiaalien arvioiminen on tärkeää mm. suunniteltaessa lämpölaitosinvestointeja. Teknis-taloudellisesti hyödynnettävissä olevan energiapuupotentiaalin laskennassa otetaan huomioon erilaisia energiapuun talteenottoa rajoittavia tekijöitä. Pienpuun korjuuta kokopuuna turvemailta ja karuilta kankailta on vältetty ravinnehävikkiriskin vuoksi. Näiltä kasvupaikoilta voidaan kuitenkin korjata karsittua energiapuuta, mikä laajentaa metsähakkeen raaka-ainepohjaa. Tämä tulee ottaa kertymätarkasteluissa huomioon.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Ainespuun ja karsitun energiapuun integroitua korjuuta ja joukkokäsittelyhakkuuseen perustuvaa karsitun energiapuun korjuuta ei ole kokonaisuutena aiemmin tutkittu. Tässä raportissa keskitytään rangan korjuun tuottavuustekijöiden ja kustannusrakenteen selvittämiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää karsitun energiapuun korjuuvaihtoehtoja ja -kustannuksia. Lisäksi tavoitteena oli selvittää alueellisesti rangan saatavuutta ja kustannusrakennetta

toimitettaessa rankaa asiakkaalle. Tavoitteena oli myös selvittää energiapuun mittauksen ongelmia hakattaessa rankaa joukkokäsittelymenetelmällä ja kehittää mittaukseen toimiva menetelmä. Tavoitteiden lähtökohtana oli rangan tuotantokustannusten alentaminen menetelmiä ja toimituslogistiikkaa kehittämällä.

2 Rangan ja kokopuun erilliskorjuun vertailu

2.1 Tutkitut laitteet ja hakkuumenetelmät

Markkinoilla on useita karsivia ja joukkokäsittelyominaisuudella varustettuja hakkuulaitteita. Tässä tutkimuksessa olivat mukana Outokummun Metalli Oy:n valmistama Timberjack 745 (kuva 1) ja Komatsu Forest Oy:n valmistama Valmet 945 Saksi (kuva 2) hakkuulaitteet. Hakkuukoneiden peruskoneet olivat Timberjack 1270 B ja Valmet 901. Metsäkuljetus suoritettiin tutkimuksessa Valmet 840.1 kuormatraktorilla. Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida energiapuun karsinnasta aiheutuvien kustannusten tasoa ja karsinnalla saavutettavia hyötyjä kokopuuna korjuuseen verrattuna.

Timberjack 745 on ensisijaisesti ainespuun korjuuseen kehitetty hakkuulaite. Tutkimuksessa käytettyyn laitteeseen oli asennettu joukkokäsittelyyn tarvittavat lisälaitteet eli joukkokäsittelyyn sopivat syöttörullat ja puita paikallaan pitävät tartuntaelimet. Katkaisu tapahtuu ketjusahalla, ja kaadettavan puun suurin läpimitta on 55 cm. Myös Valmet 945 Saksi hakkuulaitteen perustana on ainespuun korjuussa käytettävä hakkuulaite. Valmet 945 Saksi eroaa ainespuun hakkuulaitteesta siten, että normaali ketjusaha on korvattu pieniläpimittaisen puun korjuuseen soveltuvalla saksikatkaisulaitteella.

Hakkuutyön tuottavuutta tutkittiin neljällä ja metsäkuljetusta kahdella energiapuuharvennusleimikolla. Korjuussa otettiin talteen vain energiapuuta, ja jokaiselta leimikolta korjattiin sekä kokopuuta että rankaa. Hakkuussa käytettiin joukkokäsittelyä. Tällöin hakkuulaitteeseen kerättiin useita runkoja, ja niistä syntynyt taakka siirrettiin ajouran varteen käsittelyä varten. Rangan korjuussa puut karsittiin ja katkottiin noin 5-metrisiksi ja latvapölkky katkaistiin noin 3–5 cm läpimitan kohdalta. Myös kokopuuna korjuussa puut katkottiin metsäkuljetusta varten noin 5-metrisiksi. Kokopuuna korjuussa puut liikutettiin katkaisukohtaan asti syöttörullilla hakkuulaitteen läpi. Nipun katkaisun jälkeen sen latvaosa siirrettiin kourakasaan nosturilla, jolloin talteen saatiin lähes koko latvusmassa. Kuljettajien kokemus metsäkoneilla työskentelystä vaihteli parista vuodesta yli kymmeneen vuoteen.



Kuva 1. Timberjack 745 hakkuulaite (Erkki Salo).

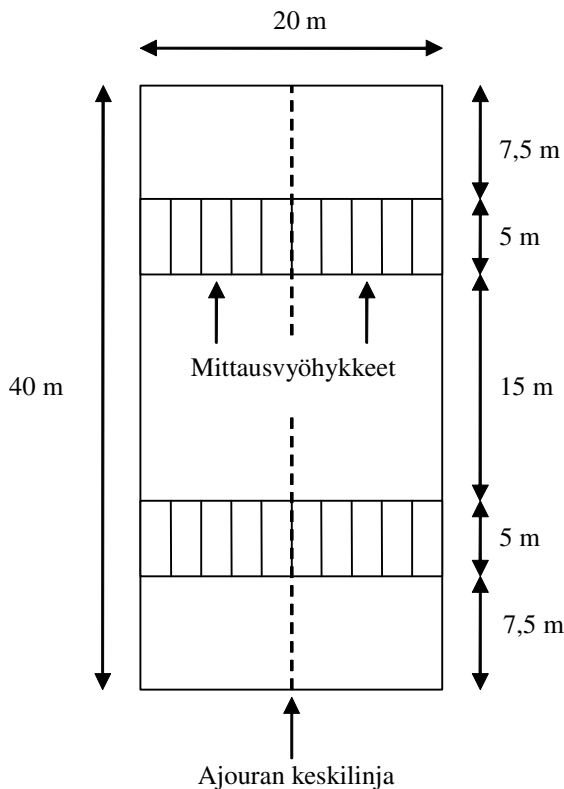


Kuva 2. Valmet 945 Saksi hakkuulaite (Matti Sirén).

2.2 Tutkimusaineisto

Neljästä tutkimusleimikosta kaksi oli männiköitä ja kaksi lehtipuuvaltaisia kohteita. Kohteista kaksi sijaitsi UPM Metsän mailla Kannonkoskella ja kaksi yksityismetsissä Savonlinnassa ja Savonrannassa. Kannonkosken kohteet valittiin UPM Metsän tietojärjestelmästä saatujen tietojen ja maastotarkastelun perusteella. Itä-Suomen kohteet olivat Metsäliitto Osuuskunnan pystykaupalla ostamia energiapuuleimikoita. Kohteiden valintakriteereinä olivat kemera-tukikelpoisuus, kuvion riittävä koko ja puuston kohtuullinen tasaisuus. Molemmat lehtipuuvaltaiset kohteet olivat hoitamattomia ja hyvin tiheitä. Männiköiden tiheys ennen käsittelyä oli koivikoita alhaisempi, mutta ainespuuharvennus ei olisi ollut näilläkään kohteilla kannattava toimenpide. Maaston kulkukelpoisuus oli kaikilla kohteilla hyvä.

Leimikoille perustettiin ennen hakkuuta suorakaiteen muotoisia, leveydeltään 20 ja pituudeltaan 30–40-metrisiä koealoja. Koealojen puusto mitattiin ennen ja jälkeen hakkuuta koealan keskelle merkityn ajouran suuntaisilta vyöhykkeiltä (kuva 3). Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 3 cm:sistä puista mitattiin rinnankorkeusläpimitta ja koepuista mitattiin läpimitan lisäksi pituus, elävän latvuksen alaraja ja ikä. Hakkuun jälkeen mittausvyöhykkeiltä laskettiin runko- ja juurivauriot sekä mitattiin ajouran leveys metsätalouden kehittämiskeskus Tapion käyttämän luokituksen mukaisesti (Äijälä ym. 2004). Lisäksi yhdellä leimikolla mitattiin metsään jäävän hakkuutähteen määrä punnitsemalla runkopuu ja elävät oksat mittausvyöhykkeiltä.



Kuva 3. Kaaviokuva aikatutkimuskoealasta (20 x 40 m) ja sen puustomittauksista.

Tutkimusleimikoiden puustotiedot korjuumenetelmittäin on esitetty taulukossa 1. Leimikoiden hakkuukertymät ja puiden keskijäretydet laskettiin rangan korjuussa runkopuuna. Kokopuu-korjuussa oksat ja neulasat sisältyvät lukuihin. Lehtipuiden lehdet eivät ole mukana luvuissa. Männikkö 1:ssä ja koivikko 1:ssä kertymä saatiin talteen otetusta energiapuusta tehdyn hakkeen tilavuutena ja männikkö 2:ssa ja koivikko 2:ssa kertymä saatiin aikatutkimuksessa kirjattujen poistettujen puiden läpimittojen avulla. Runkojen tilavuudet laskettiin käyttämällä Laasasenahon (1999) tilavuusyhtälöitä. Latvusten kuivamassat laskettiin Hakkilan (1991) latvusmassayhtälöillä. Kokopuun massa muutettiin tilavuudeksi Hakkilan (1978) esittämien tiheyslukujen avulla. Hakkuu suoritettiin männikössä 1 ja koivikossa 1 Timberjackin koneyksiköllä ja männikössä 2 ja koivikossa 2 Valmetin koneyksiköllä.

Taulukko 1. Leimikon puustotiedot.

Leimikko ja korjuumenetelmä	Koealoja, kpl	Valtapituus, m	Lähtötiheys, yli 3 cm puut/ha	Lopputiheys, yli 5 cm puut/ha	Hakkuukertymä, m ³ /ha	Poistettujen puiden keskijäreys, dm ³
Männikkö 1						
ranka	11	11,8	2 800	1 100	42	25
kokopuu	10	11,2	3 200	1 200	53	28
Männikkö 2						
ranka	4	10,0	3 300	1 200	22	17
kokopuu	4	10,6	3 200	1 200	42	24
Koivikko 1						
ranka	3	15,0	4 700	800	54	16
kokopuu	2	15,8	5 700	1 000	58	15
Koivikko 2						
ranka	2	14,5	6 500	1 100	64	20
kokopuu	3	16,5	5 800	1 100	74	17

Yhteensä karsittua rankaa hakattiin 3 122 puusta ja kokopuita 3 552 puusta. Rankaa hakattiin 20 ja kokopuuta 19 aikatutkimuskoealalta. Metsäkuljetuksen tutkimusaineisto oli pieni, kuusi kuormaa kokopuuta ja neljä kuormaa rankaa kahdelta leimikolta. Kannonkosken leimikot hakattiin lehdeettömään aikaan huhti- ja toukokuun vaihteessa 2004 ja Itä-Suomen kohteet kesäheinäkuussa 2004.

2.3 Tutkimusmenetelmät

Työn tuottavuus määritettiin aikatutkimuksella. Aikatutkimuksessa kirjattiin työn tehoajanmenekit. Hakkuussa ja metsäkuljetuksessa esiintyneet keskeytykset vähennettiin kokonaisajanmenekistä. Rangan ja kokopuun hakkuun aikatutkimus tehtiin koeloittain käyttäen seuraavaa työvaihejaottelua.

- Siirtyminen työpisteiden välillä
- Hakkuulaitteen vienti puulle ja puun katkaisu
- Puun tai puunipun kaato ja siirto käsittelypaikalle
- Puun tai puunipun karsinta ja katkonta (karsinta vain rangalla)

- Alikasvoksen raivaus
- Järjestelyt

Metsäkuljetuksen aikatutkimus tehtiin koealoista muodostuneilla lohkoilla käyttäen seuraavaa työvaihejaottelua.

- Tyhjänäajo
- Kuormaus
- Kuormausajo
- Kuormattuna-ajo
- Purku
- Järjestelyt

Työvaiheiden ajanmenekkien lisäksi hakkuun aikatutkimuksessa kirjattiin poistettavien puiden läpimitta ja metsäkuljetuksessa kuormatraktorin kulkema matka Garmin eTrex Vista GPS:n avulla.

Rangan ja kokopuun hakkuun tuottavuuden laskemiseksi laadittiin aikatutkimuksessa kirjattuihin ajanmenekkeihin ja poistettavan puuston tiheyteen ja järeyteen perustuneet puukohtaiset ajanmenekkimallit. Laskennan perusyksikkö oli 6–8 aarin aikatutkimuskoeala. Poistettavan puuston tiheys saatiin koealan koon ja poistettujen puiden lukumäärän avulla. Puiden järeys kirjattiin aikatutkimuksessa perustuen osin hakkuukoneen mittalaitteen näytöltä luettuihin läpimittoihin ja osin puihin etukäteen merkittyihin läpimittaluokkiin. Läpimittoja korjattiin vielä ennen mallien laatimista puuston ennako- ja jälkimittauksista lasketulla poistuman keskiläpimitalla. Malleja varten hakkuun työvaiheet jaettiin siirtymiseen ja käsittelyyn. Siirtyminen tarkoitti hakkuukoneen siirtymistä työpisteiden välillä ja käsittely koostui kaikista muista työvaiheista. Siirtymisaika oletettiin riippumattomaksi korjuumenetelmästä.

Hakkuumenetelmien tuottavuusvertailuissa käytettiin hakkuun puukohtaisia ajanmenekkimalleja, joissa selittävänä tekijänä oli poistettavan puun järeys. Näiden mallien laadinnassa perusyksikkönä oli yhdestä tai useammasta puusta muodostunut taakka, joka käsiteltiin ns. joukkokäsittelynä yhdellä kertaa. Hakkuun tehotuntituottavuus saatiin jakamalla hakattavan puun tilavuus puukohtaisella ajanmenekillä. Puun tilavuus laskettiin rangan hakkuussa runkopuuna ja kokopuun hakkuussa oksineen. Laskelmissa oletettiin puiden runkojen ja oksien talteenottoasteeksi 100 %.

Metsäkuljetuksen aineistoa ei kerätty tarpeeksi tuottavuusmallien laadintaa varten. Aineiston perusteella voitiin kuitenkin vertailla menetelmien tuottavuutta tutkituilla leimikoilla. Menetelmien vertailussa käytettiin 250 metrin keskikuljetusmatkaa ja rangalla 40 m³:n ja kokopuulla 50 m³:n hehtaarikertymää.

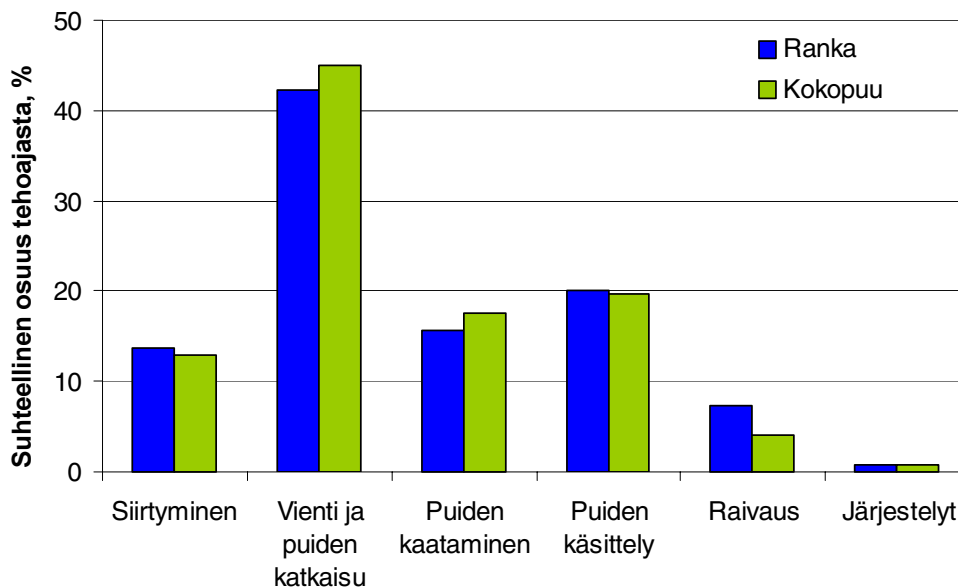
Kustannuslaskelmia varten hakkuutyön tehoajanmenekki muutettiin käyttöajanmenekiksi kertoimella 1,3. Metsäkuljetuksessa vastaava kerroin oli 1,2. Kertoimilla otettiin huomioon käytännön työssä esiintyvät keskeytykset ja mahdolliset olosuhde- ja työskentelyerot tutkimustyömaiden ja käytännössä korjattavien leimikoiden välillä. Hakkuukoneen käyttötunti-

kustannus oli laskelmassa 70 €/h ja kuormatraktorin 50 €/h. Leimikoittaiset kustannuslaskelmat tehtiin yhdistämällä rankana ja kokopuuna korjattujen koealojen puustot ja laskemalla poistettujen puiden runkolukusarjat. Runkolukusarjojen perusteella laskettiin hakkuun tuottavuus kuvassa 7 esitettyjen puukohtaisten ajanmenekkimallien avulla. Menettelyllä voitiin vähentää koealojen puustojen erilaisuudesta aiheutunutta harhaa menetelmävertailussa. Metsäkuljetuksen tuottavuus laskettiin kuvassa 9 esitettyjen ajanmenekkien pohjalta.

2.4 Tulokset

2.4.1 Hakkuun työvaiheet ja joukkokäsittelyn hyödyntäminen

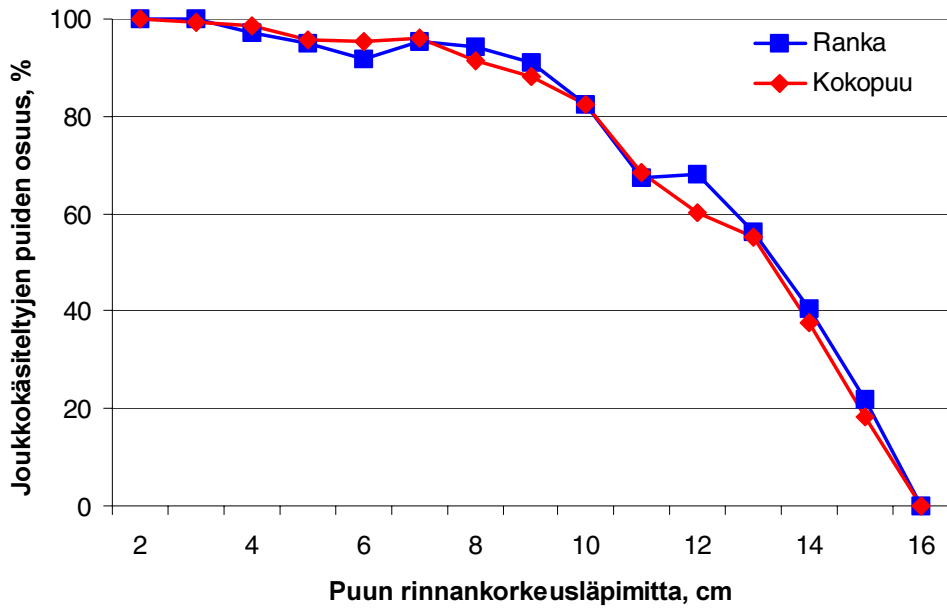
Kuvassa 4 on esitetty keskimääräinen ajanmenekin jakautuminen työvaiheisiin rangan ja kokopuun hakkuussa.



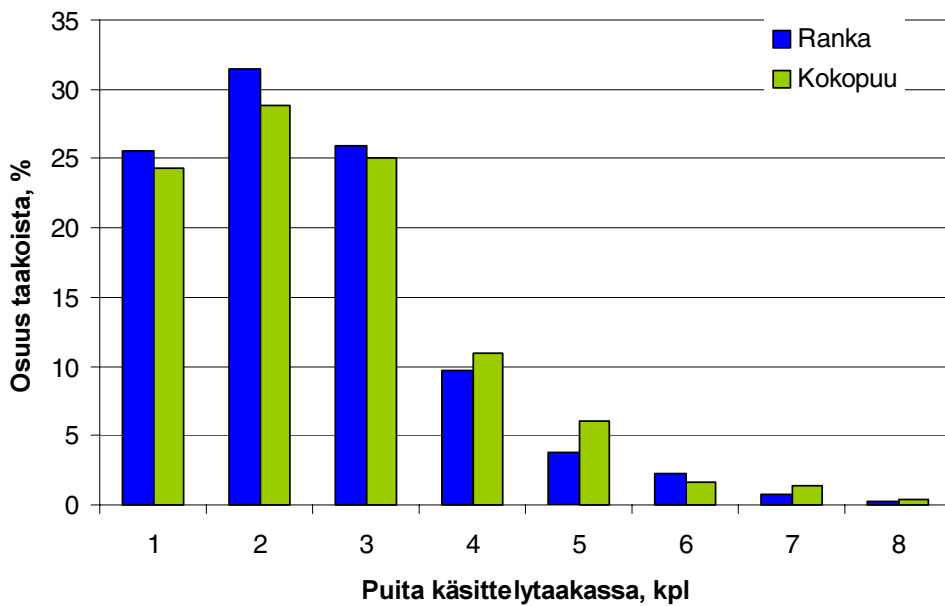
Kuva 4. Työvaiheiden osuudet tehoajanmenekistä korjuumenetelmittäin.

Korjuumenetelmien välillä ei ollut suurta eroa tehoajanmenekin jakautumisessa eri työvaiheisiin. Raivausta oli tehty rangan hakkuussa hieman enemmän kuin kokopuun hakkuussa ja vastaavasti hakkuulaitteen vientiin ja puiden katkaisuun ja kaatamiseen oli käytetty enemmän aikaa kokopuun hakkuussa. Kovin pienten puiden karsinta oli hankalaa, ja kuljettajat pyrkivät mieluummin raivaamaan nämä rungot. Kokopuuna pienten puiden talteenotto onnistui paremmin.

Korjuumenetelmällä ei näyttänyt olevan vaikutusta joukkokäsittelyn hyödyntämiseen hakkuussa (kuvat 5 ja 6). Tutkitut koneyksiköt kuljettajineen hyödynsivät joukkokäsittelyä saman verran. Kahden tai useamman puun taakoissa käsiteltiin 90,4 % puista, ja keskimäärin taakassa oli 2,6 puuta.



Kuva 5. Joukkokäsiteltujen puiden osuus rinnankorkeuslähimittan mukaan.



Kuva 6. Puiden lukumäärä käsittelytaakoissa.

2.4.2 Hakkuun ajanmenekki- ja tuottavuusmallit

Poistettavan puuston tiheys vaikutti rangan ja kokopuun hakkuussa puukohtaiseen siirtymisaikaan seuraavasti:

$$T_{siirt} = 3215,067 * x^{-0,938246}$$

missä

$$\begin{aligned} T_{siirt} &= \text{Siirtymisaika, s/puu} \\ x &= \text{Poistuman tiheys, puuta/ha} \\ r^2 &= 0,674 \\ n &= 39 \end{aligned}$$

Käsittelyajan yhtälö laskettiin erikseen rangan ja kokopuun hakkuulle. Puukohtaiseen käsittelyaikaan vaikuttivat poistuman tiheys ja poistettavien puiden läpimitta seuraavasti:

$$T_{käs_ranka} = 13,03001 + 0,89621 * d - 0,00149 * x$$

missä

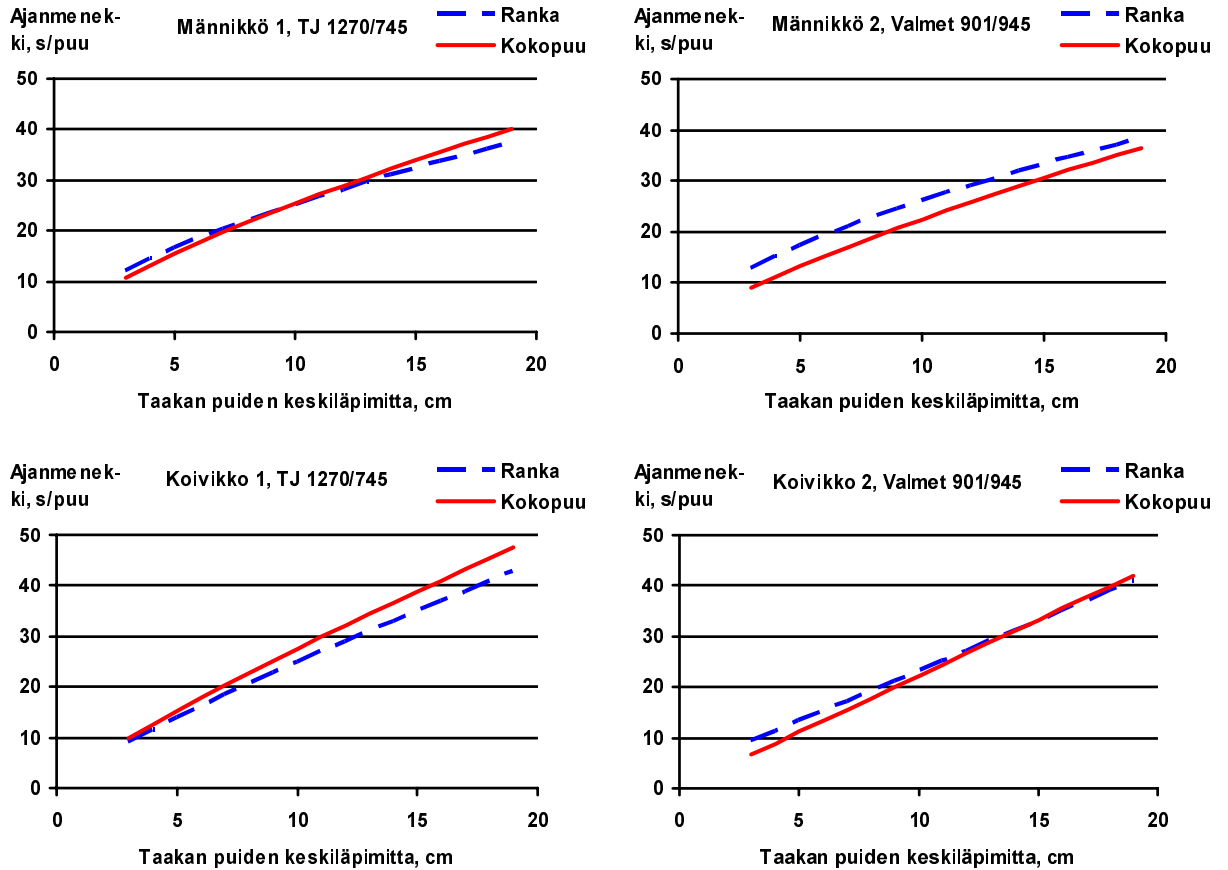
$$\begin{aligned} T_{käs_ranka} &= \text{Käsittelyaika rangan hakkuussa, s/puu} \\ x &= \text{Poistuman tiheys, puuta/ha} \\ d &= \text{Poistettavien puiden aritmeettinen keskiläpimitta, cm} \\ r^2 &= 0,761 \\ n &= 20 \end{aligned}$$

$$T_{käs_kokopuu} = 2,92328 + 2,16711 * d - 0,00103 * x$$

missä

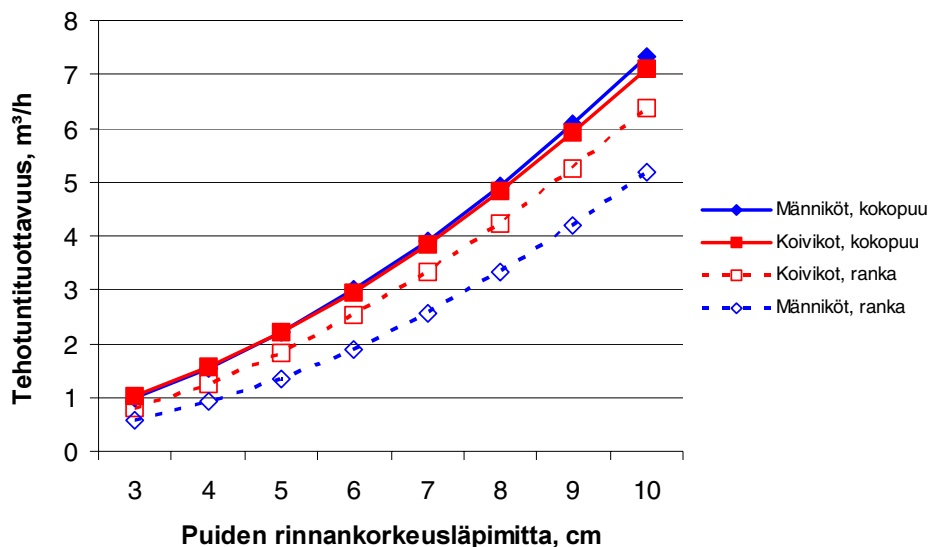
$$\begin{aligned} T_{käs_kokopuu} &= \text{Käsittelyaika kokopuun hakkuussa, s/puu} \\ x &= \text{Poistuman tiheys, puuta/ha} \\ d &= \text{Poistettavien puiden aritmeettinen keskiläpimitta, cm} \\ r^2 &= 0,502 \\ n &= 19 \end{aligned}$$

Kuvassa 7 on esitetty hakkuun puukohtaiset tehoajanmenekit taakan puiden keskiläpimitan funktiona korjuumenetelmittäin. Mallien laskenta perustui tässä taakoittain kirjattuun ajanmenekkiin. Korjuumenetelmä ei näyttänyt juuri vaikuttavan hakkuun puukohtaiseen ajanmenekkiin. Rankamenetelmä oli jonkin verran kokopuumenetelmää hitaampi pienillä rungoilla ja ero pieneni puun koon kasvaessa.



Kuva 7. Hakkuun puukohtainen ajanmenekki käsittelytaakan puiden keskiläpimitan mukaan.

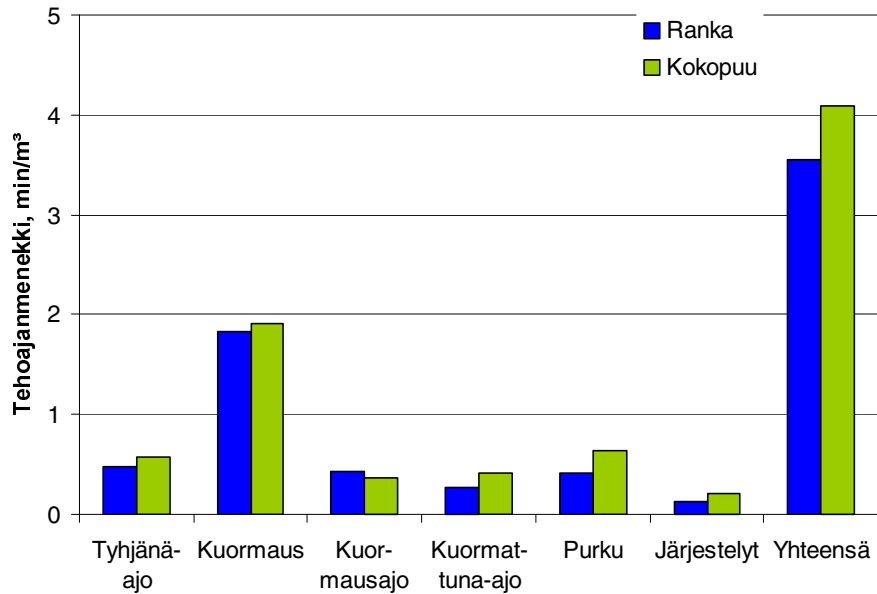
Kuvassa 8 on esitetty hakkuun tehotuntuottavuus leimikkoryhmittäin poistettavien puiden läpimitan funktiona. Kokopuun hakkuun tuottavuus oli männiköissä ja koivikoissa samaa tasoa, mutta männiköissä karsinta laski tuottavuutta 30–40 % ja koivikoissa selvästi vähemmän eli 10–20 %. Tämä johtui pääosin siitä, että tiheissä koivikoissa oksien karsinta laski hakkuukertymää vähemmän kuin männiköissä.



Kuva 8. Rangan ja kokopuun hakkuun tehotuntuottavuus.

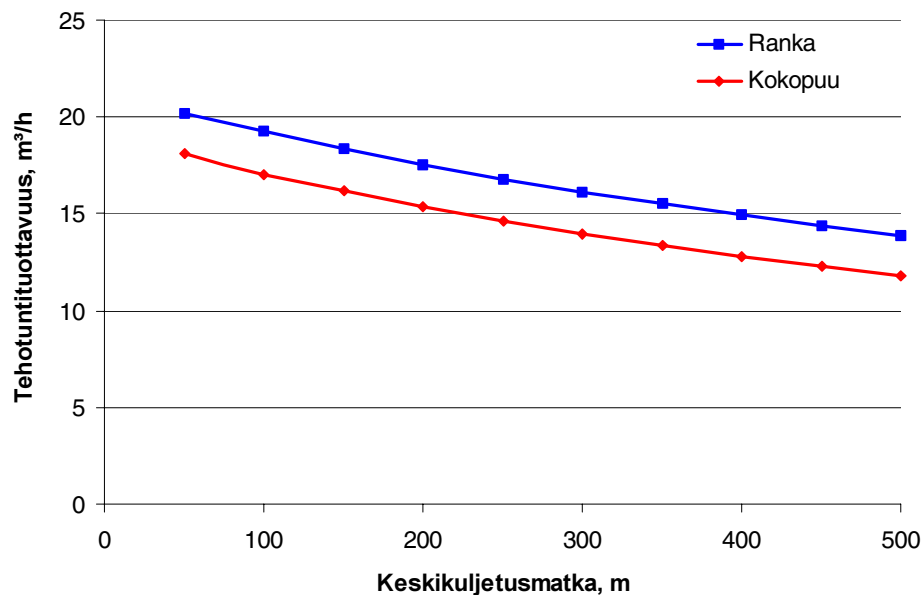
2.4.3 Metsäkuljetuksen ajanmenekki ja tuottavuus

Metsäkuljetuksen ajanmenekki työvaiheittain 250 metrin keskikuljetusmatkalla on esitetty kuvassa 9. Rangalla metsäkuljetuksen ajanmenekki oli noin 12 % pienempi kuin kokopuulla. Keskimääräinen kuormakoko oli rangalla 10,1 m³ ja kokopuulla 7,7 m³. Suuremmasta kuormakokosta johtuen tyhjänä- ja kuormattuna-ajoon käytettiin rangan metsäkuljetuksessa vähemmän aikaa kuin kokopuun menetelmässä. Myös kuormaus ja erityisesti purku oli rankamenetelmässä tehokasta.



Kuva 9. Rangan ja kokopuun metsäkuljetuksen tehoajanmenekki työvaiheittain.

Keskikuljetusmatka vaikutti metsäkuljetuksen tuottavuuteen kuvassa 10 esitetyllä tavalla. Rangan metsäkuljetuksen tuottavuus oli 10–20 % suurempi kuin kokopuun ja ero kasvoi hieman kuljetusmatkan pidentyessä.



Kuva 10. Metsäkuljetuksen tehotuntituottavuus korjuumenetelmittäin.

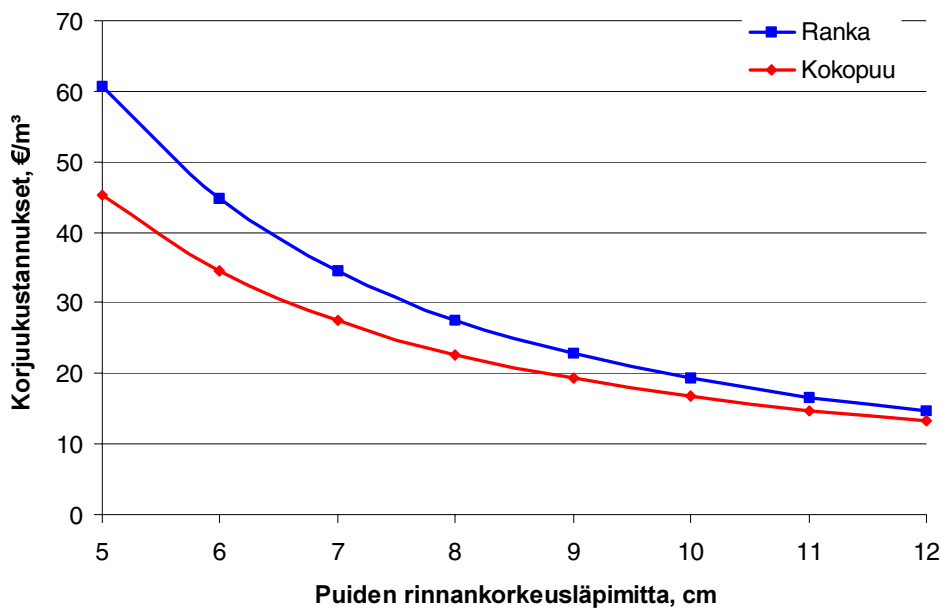
2.4.4 Rangan ja kokopuun korjuun kustannukset

Taulukossa 2 on esitetty hakkuun ja metsäkuljetuksen tuottavuudet ja kustannukset korjuumenetelmittäin tutkimusleimikoissa.

Kuvasta 11 käy ilmi puiden järeyden vaikutus kustannuksiin. Rangan korjuu on selvästi kokopuun korjuuta kalliimpaa pienillä puilla, mutta järeillä puilla ero on pienempi. Puiden läpimitan ollessa 5 cm, rangan korjuu on 15,3 €/m³ (34 %) kokopuun korjuuta kalliimpaa ja 12 cm:n puilla ero on 1,4 €/m³ (11 %).

Taulukko 2. Hakkuun ja metsäkuljetuksen laskennalliset tuottavuudet ja kustannukset korjuumenetelmittäin.

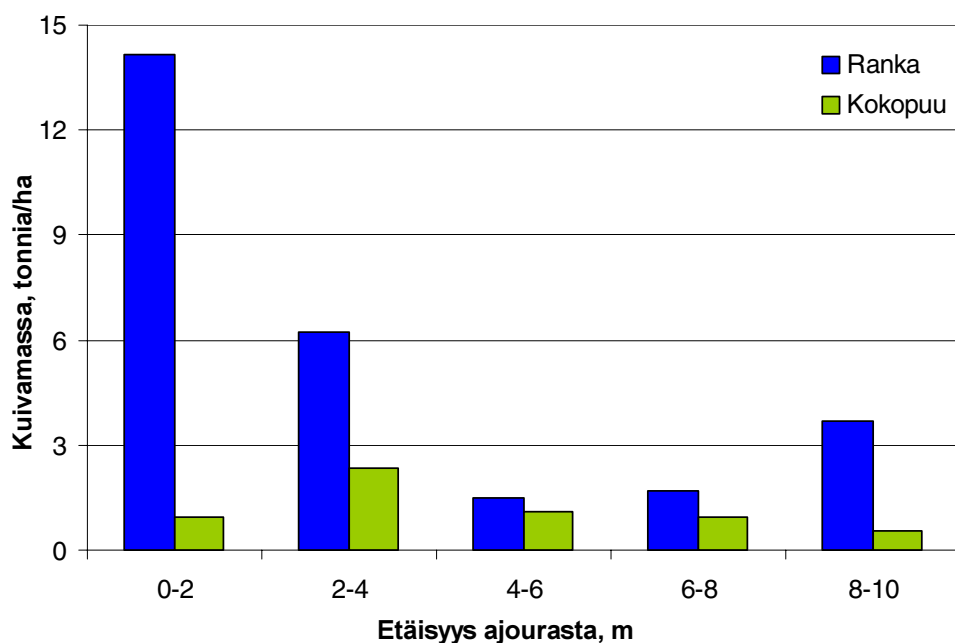
Leimikko ja korjuumenetelmä	Hakkuun tuottavuus		Metsäkuljetuksen tuottavuus		Korjuun kustannukset		
	m ³ /tehotunti	m ³ /käytötunti	m ³ /tehotunti	m ³ /käytötunti	Hakkuu, /m ³	Metsäkuljetus, /m ³	Yht., /m ³
Männikkö 1							
ranka	3,6	2,8	16,7	13,9	25,5	3,6	29,0
kokopuu	4,9	3,7	14,6	12,2	18,7	4,1	22,8
Männikkö 2							
ranka	3,4	2,6	16,1	13,4	26,8	3,7	30,5
kokopuu	5,5	4,3	14,2	11,9	16,4	4,2	20,6
Koivikko 1							
ranka	3,4	2,6	17,6	14,7	26,9	3,4	30,3
kokopuu	3,6	2,7	15,0	12,5	25,6	4,0	29,6
Koivikko 2							
ranka	3,8	2,9	17,6	14,7	24,0	3,4	27,4
kokopuu	5,0	3,9	15,0	12,5	18,2	4,0	22,2
Keskimäärin							
ranka	3,5	2,7	17,0	14,2	25,8	3,5	29,3
kokopuu	4,7	3,6	14,7	12,3	19,7	4,1	23,8



Kuva 11. Energiapuun korjuukustannukset menetelmittäin.

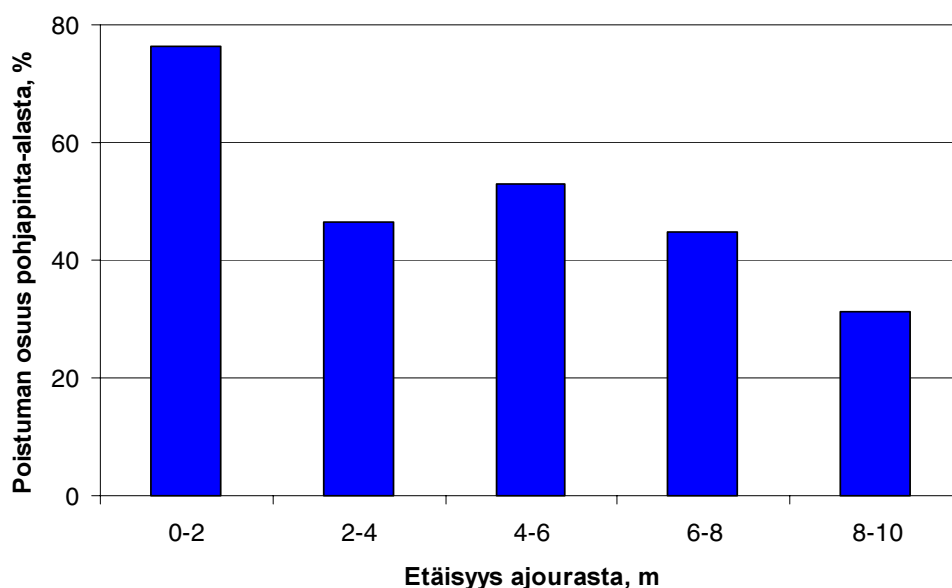
2.4.5 Korjuujälki

Metsään jäävän hakkuutähteen määrä mitattiin männikössä 1. Rangan korjuussa metsään jäi 4,0 m³ runkopuuta ja 10,1 m³ eläviä oksia hehtaarilla. Runkopuu otettiin talteen noin 90-prosenttisesti ja lähes kaikki oksat jäivät palstalle. Hakkuutähde keskittyi ajouran läheisyyteen (kuva 12). Kokopuun korjuussa metsään jäi 1,2 m³ runkopuuta ja 1,8 m³ eläviä oksia hehtaarilla. Kokopuusta otettiin talteen yli 94 %. Rankana korjuussa metsään jäi hakkuutähteisiin sitoutunutta typpeä 27 kg/ha enemmän kuin kokopuuna korjuussa.



Kuva 12. Hakkuutähteen määrä ja sijainti rangan ja kokopuun korjuussa.

Korjuujäljessä mahdollisesti esiintyvien menetelmien välisten erojen tarkka selvittäminen olisi vaatinut oleellisesti suurempia ja erilaisia aineistoja kuin tässä tutkimuksessa kerättiin. Mittausten perusteella korjuujäljessä ei ollut merkittävää eroa menetelmien välillä, mutta leimikoiden välinen vaihtelu oli suurta. Kasvatettavista puista vaurioitui karsitun rangan hakkuussa 5,3 % ja kokopuun hakkuussa 7,0 %. Metsäkuljetuksessa syntyneet vauriot kirjattiin vain kahdella leimikolla, joilla kasvatettavista puista vaurioitui rangan kuljetuksessa 1,7 % ja kokopuun kuljetuksessa 1,4 %. Hakkuun jälkeinen kasvatettavan puuston määrä oli metsänhoitosuosituksen mukainen. Hakkuuvoimakkuus ajourien välisellä alueella oli suhteellisen tasaista riippumatta etäisyydestä ajouraan (kuva 13).



Kuva 13. Poistuman osuus pohjapinta-alasta eri etäisyyksillä ajouran keskilinjasta. Etäisyys 0–2 metriä käsitti ajouran ja joitakin uran reunapuita.

3 Karsitun aines- ja energiapuun integroitu korjuu

3.1 Hakkuulaite ja -menetelmä

Ainespuuhakkuuseen integroitua energiapuun korjuuta voidaan tehdä harvennus- tai yleis-harvestereilla. Tässä osatutkimuksessa karsitun aines- ja energiapuun integroidun korjuun tuottavuutta tutkittiin Sampo Rosenlew 1046X-harvennusharvesterilla, johon oli asennettu Keto 51-hakkuulaite (kuva 14).

Yhdistetyssä aines- ja energiapuun hakkuussa käytettiin perinteistä yksinpuinkäsittelytekniikkaa. Sekä aines- että energiapuuositteet karsittiin (kuva 15). Ainespuu ja ainespuuksi kelpaamaton puu (ainespuiden latvat ja ainespuuksi kelpaamattomat pienet rungot) hakattiin erillisiin kasoihin. Pienikokoiset rungot hakattiin energiapuuksi ainespuuhakkuun yhteydessä aina, kun se onnistui ilman ylimääräisiä peruskoneen siirtymisiä.



Kuva 14. Sampo Rosenlew 1046X männikön ensiharvennuksessa (Arto Mutikainen).



Kuva 15. Tavaralajimenetelmään perustuvassa aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa ainespuu ja ainespuuksi kelpaamaton pieniläpimittainen runkopuu hakattiin metsäkuljetusta varten omiin kasoihinsa (Arto Mutikainen).

3.2 Aikatutkimusaineisto ja -menetelmä

Aikatutkimusaineisto kerättiin Lumijoella Metsäliitto osuuskunnan ainespuukorjuuseen ostamassa leimikossa. Leimikko sisälsi kolme erityyppistä korjuukohdetta: kuusi-lehtipuu sekametsän, männikön ensiharvennuksen ja männikön myöhemmän harvennuksen. Tutkimusmetsiköiden puustotiedot kerättiin ennen hakkuuta linjoittaista ympyräkoelamenetelmää käyttäen (taulukko 3).

Taulukko 3. Tutkimusmetsiköiden metsikkö- ja puustotiedot.

Metsikkö	Leimikkotyyppi	Kasvatettava pääpuulaji	Ennen harvennusta		Harvennuksen jälkeen	
			m ³ /ha	kpl/ha	m ³ /ha	kpl/ha
1	Ensiharvennus	Kuusi	232	3014	135	940
2	Ensiharvennus	Mänty	136	2164	92	1090
3	Toinen harvennus	Mänty	195	1555	130	820

Aineisto käsitti yhteensä 899 puuta (48,2 m³). Hakatusta puutavarasta oli mäntyä 54, kuusta 26 ja lehtipuuta 20 %. Ainespuun minimiläpimittana oli männyllä sekä kuusella 6, koivulla 7 ja haavalla 8 senttimetriä. Energiapuun hakattiin 3 senttimetrin minimiläpimittaan. Puutavara mitattiin hakkuukoneen mittalaitteella. Leimiköiden hehtaarikertymät ja poistuman keskikoko on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Tutkimusmetsiköiden hakkuukertymä ja poistuman keskikoko.

Metsikkö	Ainespuut				Pienpuut ²⁾		Yhteensä ³⁾	
	Ainespuu ¹⁾		Latvakappaleet ²⁾		m ³ /ha	dm ³ /puu	m ³ /ha	dm ³ /puu
	m ³ /ha	dm ³ /puu	m ³ /ha	dm ³ /puu				
1	77,3	66	10,0	10	9,8	11	97,2	47
2	35,0	60	4,2	8	4,3	9	43,6	41
3	60,4	93	4,0	7	0,8	10	65,3	89

¹⁾ Ainespuuosite, ²⁾ Energiapuuosite, ³⁾ Aines- ja energiapuuositteet yhteensä

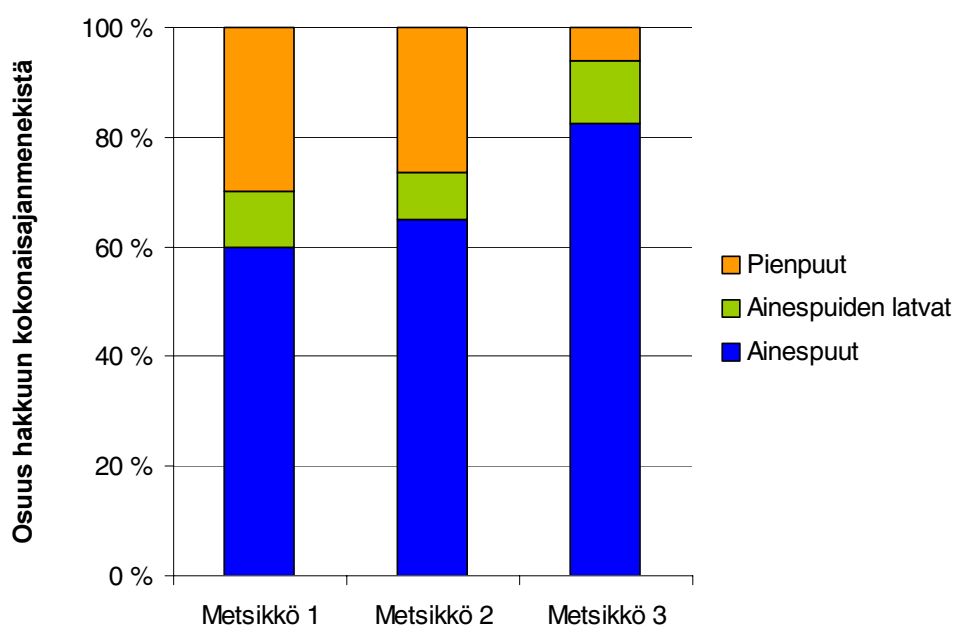
Hakkuun ajanmenekki jaettiin työvaiheittain siten, että ajanmenekki pystyttiin kohdistamaan erikseen perustyönä olleelle ainespuuhakkuulle ja ainespuuhakkuun lisätyönä tehdyille energiapuuhakkuulle sekä integroidulle hakkuulle yhteensä. Hakkuun kokonaistehoajanmenekki sisälsi puutavaralajiositteittain seuraavat työvaiheet:

- **Ainespuuhakkuun** ajanmenekki sisälsi peruskoneen siirtymiset, ainespuiden kaadon, karsinnan ja katkonnan, alikasvoksen raivauksen sekä työn järjestelyt.
- Ainespuuhakkuuseen yhdistetty ainespuumitat täyttämättömien **latvojen energiapuiksi hakkuun** ajanmenekki sisälsi latvojen siirtämisen energiapuukasalle, karsinnan ja latvan katkaisun.
- Ainespuumitat täyttämättömien **pienpuiden energiapuiksi hakkuun** ajanmenekki sisälsi puiden kaadon, karsinnan ja latvan katkaisun.
- Aines- ja energiapuun **integroitu hakkuu** sisälsi yhteenlasketun ainespuuhakkuun, latvakappaleiden hakkuun ja pienpuiden hakkuun ajanmenekin.

3.3 Tulokset

3.3.1 Hakkuun ajanmenekki

Ainespuiden latvojen hakkuu lisäsi hakkuun ajanmenekkiä tutkimusmetsiköissä keskimäärin 15 %, kun 88 % latvoista hakattiin energiapuuksi. Ainespuuksi kelpaamattomien pienten puiden hakkuu lisäsi hakkuun ajanmenekkiä 35 % hakattujen ainespuumitat täyttämättömien puiden kertymän (puuta/ha) ollessa 60 % ainespuukertymästä. Aines- ja energiapuun integroidun hakkuun ajanmenekki oli 50 % suurempi kuin ainespuuhakkuun. Kuvassa 16 on esitetty ajanmenekin jakautuminen aines- ja energiapuuositteille tutkimusmetsiköittäin.



Kuva 16. Aines- ja energiapuun integroidun hakkuun ajanmenekin jakautuminen ainespuuhakkuuseen sekä lisätyönä tehtyyn ainespuiden latvojen ja ainespuumitat täyttämättömien puiden hakkuuseen tutkimusmetsiköissä.

Ainespuuhakkuulle ja ainespuuhakkuun lisätyönä tehdyille latvojen ja pienpuiden hakkuulle laadittiin ajanmenekki-funktiot hakatun puunosan tilavuuden mukaan. Ajanmenekki-funktiot ovat muotoa:

$$y = a + bx$$

missä

y = Tehoajanmenekki, cmin/puun osa

x = Puun osan koko, dm³

a = Vakio

b = Kerroin

Taulukossa 5 on esitetty funktioiden kertoimet ja selitysasteet. Ainespuun latvojen ja pienpuiden hakkuun yhtälöiden selitysasteet olivat selvästi pienemmät kuin ainespuun hakkuun yhtälön.

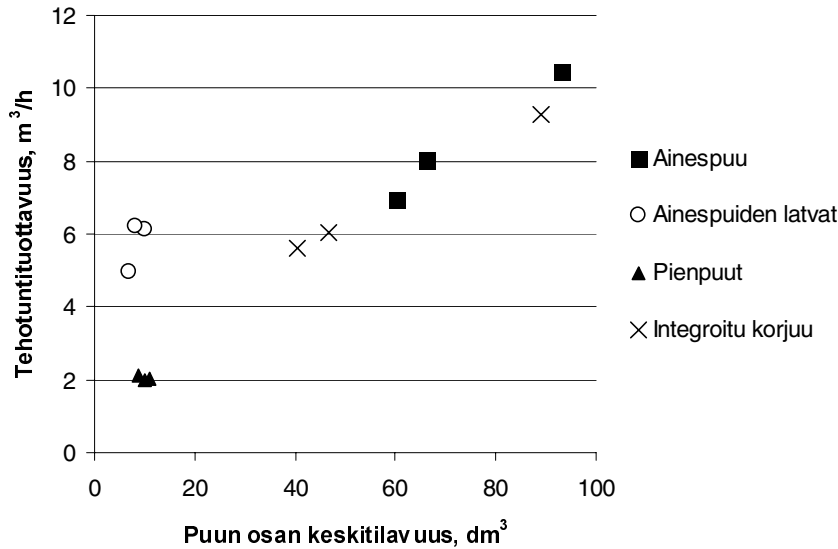
Taulukko 5. Ajanmenekkiyhtälöiden kertoimien arvot.

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo
Ainespuuhakkuu			
a	40,111	0,685	58,531 ***
b	0,152	0,007	22,019 ***
		n=557	R ² =0,466 ***
Ainespuiden latvojen hakkuu			
a	6,904	0,369	18,709 ***
b	0,222	0,039	5,668 ***
		n=490	R ² =0,062 ***
Pienpuiden hakkuu			
a	23,117	1,089	21,237 ***
b	0,660	0,096	6,902 ***
		n=332	R ² =0,126 ***

*** $p < 0,001$

3.3.2 Hakkuun tuottavuus

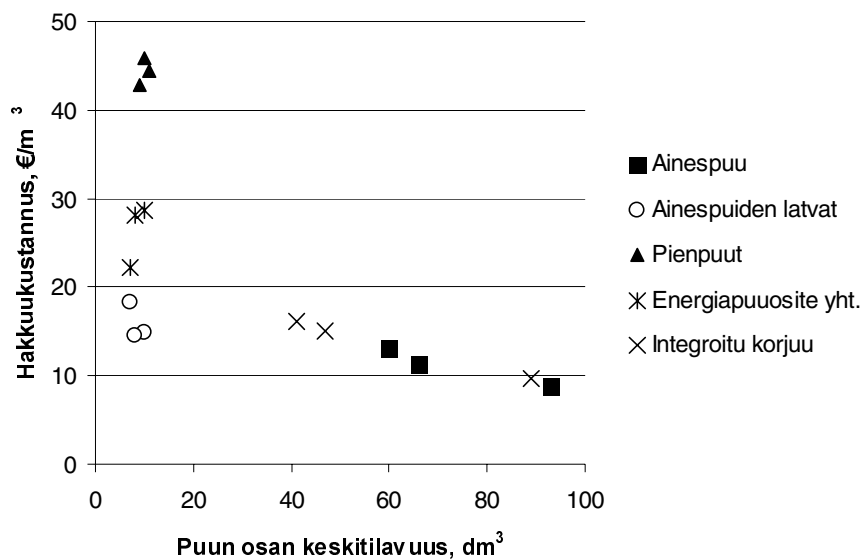
Hakkuun tuottavuus laskettiin erikseen ainespuuhakkuulle ja ainespuuhakkuun lisätyönä tehdyille ainespuiden latvojen ja pienten puiden hakkuulle sekä integroidulle hakkuulle yhteensä. Ainespuuhakkuun tuottavuus tutkimusmetsiköissä oli keskimäärin 8,5 m³ tehotunnissa. Ainespuuhakkuun lisätyönä tehdyn pienpuiden hakkuun tehotuntuottavuus oli 2,1 m³ sekä ainespuiden latvakappaleiden hakkuun vastaavasti 5,8 m³. Koko energiapuuositteeseen hakkuun keskimääräiseksi tehotuntuottavuudeksi saatiin 3,2 m³ ja integroidun hakkuun 6,8 m³. Tuottavuus tutkimusmetsiköittäin on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Ainespuuhakkuun, ainespuuhakkuun lisätyönä tehdyn ainespuiden latvojen ja ainespuumitat täyttämättömien runkojen sekä integroidun hakkuun tuottavuus rungon osan keskitilavuuden mukaan tutkimusmetsiköissä.

3.3.3 Korjuukustannukset

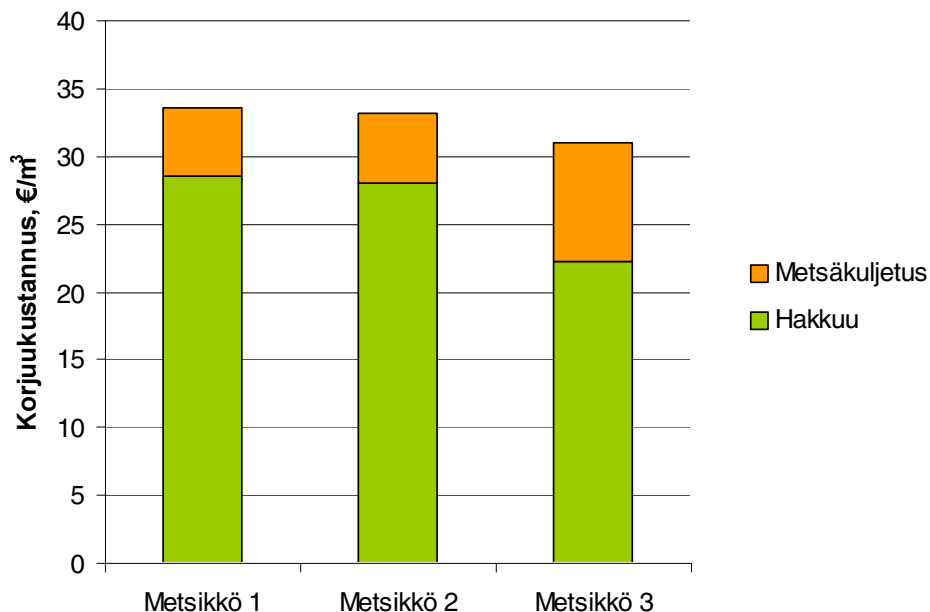
Hakkuun tehoajanmenekki muutettiin kustannuslaskelmissa käyttöajanmenekiksi kertoimella 1,393 (Ryynänen ja Rönkkö 2001), ja hakkuukoneen käyttötuntikustannuksena käytettiin 65 €. Ainespuuhakkuun kustannukset tutkimusmetsiköissä olivat keskimäärin 10,6 €/m³. Ainespuuhakkuun lisätyönä hakattujen latvakappaleiden hakkuukustannus oli 15,6 €/m³ ja pienpuiden peräti 44,1 €/m³. Energiapuuositteiden hakkuukustannukset olivat keskimäärin 27,4 €/m³. Aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa olivat hakkuukustannukset 13,4 €/m³. Hakkuukustannukset tutkimusmetsiköittäin on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Ainespuun, ainespuiden latvojen, ainespuumitat täyttämättömien pienpuiden, energiapuuositteiden yhteensä ja integroidun hakkuun kustannukset rungon osan keskitilavuuden mukaan tutkimusmetsiköissä.

Puutavaralajitiheys (m^3/ha) vaikuttaa paljon metsäkuljetuksen tuottavuuteen. Aines- ja energiapuun integroidussa korjuussa pienet energiapuukertymät voidaan kuljettaa joko erilliskuormina tai muiden puutavaralajien yhteydessä sekakuormina. Tässä tutkimuksessa energiapuuositteen metsäkuljetuksen tuottavuus laskettiin erilliskuormissa tehdylle metsäkuljetukselle Kuiton ym. (1994) mallilla. Laskenta tehtiin lyhyelle havukuitupuulle ja 250 metrin metsäkuljetusmatkalle. Metsätraktorin käyttötuntikustannuksena laskelmissa oli 50 €. Energiapuun keskimääräiseksi metsäkuljetuskustannukseksi saatiin $5,4 \text{ €/m}^3$. Metsäkuljetuskustannus oli $5,0 \text{ €/m}^3$ metsikössä 1, $5,1 \text{ €/m}^3$ metsikössä 2 ja $8,7 \text{ €/m}^3$ metsikössä 3.

Energiapuun keskimääräiseksi korjuukustannukseksi (hakkuu + metsäkuljetus) saatiin $32,6 \text{ €/m}^3$. Metsikön 3 kustannukset olivat pienemmästä hehtaarikertymästä huolimatta metsiköitä 1 ja 2 alhaisemmat, koska sen energiapuukertymä muodostui lähes yksinomaan ainespuiden latvoista, joiden hakkuukustannus oli huomattavasti pienpuita pienempi (kuva 19).



Kuva 19. Energiapuun korjuukustannukset tutkimusmetsiköittäin.

4 Karsitun energiapuun saatavuus maan eri osissa

4.1 Karsitun energiapuun kertymien laskentaperusteet

Karsitun energiapuun kertymätarkastelut perustuivat valtakunnan metsien 8. ja 9. inventoinnin (VMI 8 ja VMI 9) (Tomppo ym. 1998a, Tomppo ym. 1999a, Tomppo ym. 1999b, Tomppo ym. 1999c, Tomppo ym. 2000, Korhonen ym. 2000a, Korhonen ym. 2000b, Korhonen ym. 2000c, Tomppo ym. 2001a, Tomppo ym. 2001b, Korhonen ym. 2001, Tomppo ym. 2003) metsäkeskuskohtaisiin koealatietoihin sekä monilähdeinventoinnin (METINFO 2004, Tomppo ym. 1998b) kuntakohtaisiin tietoihin. Laskennassa olivat mukana ne varttuneiden taimikoiden ja

nuorten kasvatusmetsien VMI-koealat, joilla oli ensimmäisellä 5-vuotiskaudella taimikonhoidon tai ensiharvennuksen tarve.

Laskentakuvion eli VMI-koealan edustama pinta-ala laskenta-alueen kunnissa laskettiin metsäkeskuksittain seuraavalla kaavalla (Laitila ym. 2004):

$$N_{khl,y} = \frac{\frac{a_{khl}}{A_{khl}} \times A_{khl,y}}{n_{khl}}$$

missä

$N_{khl,y}$ = Yhden ensiharvennus- tai taimikonhoitotarpeessa olevan koealan edustama ala kehitysluokassa *khl* kunnassa *y*.

a_{khl} = Ensiharvennus- ja taimikonhoitoalan estimaatti VMI:n mukaan kehitysluokalle *khl* koko metsäkeskuksessa.

A_{khl} = Kehitysluokan *khl* alan estimaatti VMI:n mukaan.

$A_{khl,y}$ = Kehitysluokan *khl* alan estimaatti kunnassa *y* monilähdeinventoinnin mukaan.

n_{khl} = Ensiharvennuksen tai taimikonhoidon tarpeessa olevien koealojen lukumäärämetsäkeskuksen alueella kehitysluokassa *khl*.

Kertymätarkastelussa oli mukana simuloidussa harvennuksessa poistettujen, rinnankorkeusläpimitaltaan yli 4 cm puiden runkopuu. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 4 cm puut eivät olleet mukana kertymätarkastelussa. Harvennukset simuloitiin laskennallisesti Tapion harvennusmallien alarajalle. Varsinaiseksi energiapuuksi laskettiin ne rungot, joiden rinnankorkeusläpimitta oli 4–9 cm tai jotka eivät puulajinsa vuoksi täyttäneet puunostajien yleisesti soveltamia laatuvaatimuksia (muut lehtipuut). Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 9 cm mänty-, kuusi- ja koivurunkojen käyttöosa luokiteltiin ainespuuksi. Ainespuun minimiläpimitta oli 6 cm kuoren päältä ja rungosta piti saada vähintään 2 metrin mittainen pölkky. Lopullisia tuloksia laskettaessa kertymää ei jaoteltu erikseen aines- ja energiapuuhun, vaan kaikki harvennuspoistuman puut oletettiin korjattavan karsittuna rankana energiakäyttöön.

VMI:n koealatiedoissa oli eriteltyä mm. seuraavat muuttujat: kasvupaikka ja päätyyppi (kangas, korpi, räme), vallitseva puulaji, puuston keskiläpimitta ja keskipituus, rungon keskitilavuus, hakkuun kiireellisyys (myöhässä tai ensimmäisen 5-vuotiskauden aikana). Lisäksi koealatietoihin estimoitiin harvennuksen aines- ja rankapuukertymä (m³/ha) puulajeittain. Kertymät estimoitiin simuloimalla koealan puustolle alaharvennus, jossa koealalta mitattuja puita poistettiin suurusjärjestyksessä pienimmästä puusta lähtien kunnes harvennusmallien alaraja saavutettiin. Pienpuun koealakohtainen kertymätieto muutettiin laskentakuvion edustamaksi kertymäksi, kun koealan kertymätieto (m³/ha) kerrottiin laskentakuvion edustamalla pinta-alalla (ha). Käytännössä hakkuutoimenpiteitä suoritetaan kooltaan vaihteleville metsikkökuvioille. Lievän yliarvion laskennalliseen energiapuupotentiaaliin aiheutti se, että korjuuseen soveltuvan metsikkökuvion minimipinta-alaa ei voitu ottaa rajoitteeksi kertymätarkasteluun.

Karsitun energiapuun saatavuus laskettiin Jyväskylässä, Joensuussa, Kouvolassa, Valkeakoskella, Kajaanissa, Vaasassa ja Rovaniemellä sijaitseville käyttöpaikoille, joiden hankinta-alueen säde on 100 kilometriä tieverkkoa pitkin. Kertymätarkasteluissa karsitun energiapuun saatavuudelle nuorista kasvatusmetsistä asetettiin koelatioiden perusteella seuraavat rajoitteet:

- Ainespuun kertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja rankapuun kertymän piti olla vähintään 25 m³/ha.
- Rankapuun kertymät laskettiin, 3, 4 ja 5 cm:n minilatvaläpimitalle.
- Karsitun ja katkotun rangan pituus oli joko 3 tai 5 metriä.

Rankapuun tilavuus ja kertymät puulajeittain eri minimilatvaläpimitoilla laskettiin VMI koelaitteilla puuston keskiläpimitan ja keskipituuden perusteella. Keskiluvuilla pölkyttäminen ei anna tarkinta mahdollista tulosta latvaläpimitan vaikutuksesta kertymiin, mutta sopii tähän tarkasteluun, jossa energiapuuta prosessoidaan joukkokäsittelyä ja katkaisukohta määräytyy käytännössä silmämääräisesti ja keskimääräisen latvaläpimitan mukaan. Pölkyttäminen tehtiin puulajeittain siihen kehitetyllä laskentaohjelmalla (Pasanen 2004).

4.2 Karsitun energiapuun pölkyttäminen eri katkaisuläpimitoilla

Karsittujen energiapuurunkojen tilavuuksien laskennassa ja pölkyttämisessä käytettiin RUTILA-taulukkolaskentaohjelmaa, jolla voidaan laskea runkokohtainen aines- ja energiapuun sekä latvusmassan kertymä (Pasanen 2004). Laskenta perustuu rungolle laadittavaan runkokäyräyhtälöön, joka kuvaa rungon suhteellisen läpimitan kaikilla rungon korkeuksilla. RUTILA-ohjelmassa käytetään Laasasenahon (1982) kahdeksan muuttujan runkokäyräyhtälöä

$$\frac{d_l}{d_{.2h}} = b_1 x^1 + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^5 + b_5 x^8 + b_6 x^{13} + b_7 x^{21} + b_8 x^{34} = f_{rk}(x)$$

missä

d_l = Rungon läpimitta korkeudella l [0-puun pituus h]

$d_{.2h}$ = Rungon läpimitta referenssikorkeudella eli 20 % suhteellisella korkeudella

b_i = Polynomille estimoidut puulajikohtaiset kertoimet

$x = 1 - l/h$ on suhteellinen korkeus rungolla, joka saa arvoja väliltä [0,1]

Laskentaohjelma soveltaa runkokäyräyhtälöä siten, että rungon läpimitta lasketaan 10 cm:n välein. Muodostetulta runkokäyrältä sovellus laskee, millä rungon korkeudella saavutetaan kulloinkin tarkastelun kohteena oleva minimilatvaläpimitta (3, 4 tai 5 cm). Tämän korkeuden perusteella sovellus laskee energiapuurunkolle tilavuuden kaavalla:

$$\frac{\pi}{4} \times d^2 \cdot 2h \times h \times \sum_{i=0}^n f^2_{rk}(x_i)$$

missä

$$\sum_{i=0}^n f^2_{rk}(x_i) \text{ on runkokäyräyhtälön arvojen } x_i \text{ summa välillä } [0-i_{\text{minimilpm}}]$$

Rungon pölkytystä varten RUTILA-ohjelmaan lisättiin katkontamalli, jossa rungosta tehtiin joko 3 tai 5 m pituinen pölkkö, poikkeuksena alle 5 metrin rungot joista talteen otettiin koko runko katkaisukohtaan saakka. Taulukko 6 selventää rangan katkonnan periaatetta.

Taulukko 6. Pölkköjen jakautuminen (kpl) pituusluokkiin energiarungon pituuden suhteen.

Rungon pituus	3-5 m	3 m	5 m	yht. m
3,0 - 4,9	1			3-5
5,0 - 5,9			1	5
6,0 - 7,9		2		6
8,0 - 8,9		1	1	8
9,0 - 9,9		3		9
10,0 - 10,9			2	10
11,0 - 11,9		2	1	11
12,0 - 12,9		4		12
13,0 - 13,9		1	2	13
14,0 - 14,9		3	1	14

Pölkytysmallia sovellettaessa laskettiin kullekin pölkyille tilavuus kaavalla, jossa:

$$\sum_{i=0}^n f^2_{rk}(x_i) \text{ on runkokäyräyhtälön arvojen } x_i \text{ summa välillä } [i_{\text{pölkynalakorkeus}} - i_{\text{pölkynyläkorkeus}}]$$

Laskemalla rungon tilavuus asetettuun minimiläpimittaan saakka sekä valittua pölkytysmallia vastaavat tilavuuskertymät, voidaan näiden erotuksena arvioida sekä rangan pituuden että minimiläpimittavaatimuksen vaikutusta karsitun energiapuun kertymään. Laskennassa rangan pituus sai olla joko 5 m tai 3 m, poikkeuksena alle 5 m rungot, joista talteen otettiin koko runko katkaisuläpimittaan saakka. Laskennassa käytetty katkontamalli vastaa hyvin tilannetta käytännön puunkorjuussa, jossa kuitupuulla pyritään 5 m pituuteen ja 3 m tai sitä pidemmät kuituosat ovat ns. apumittoja, jotka mahdollistavat ainespuuosan mahdollisimman tarkan talteensaannin.

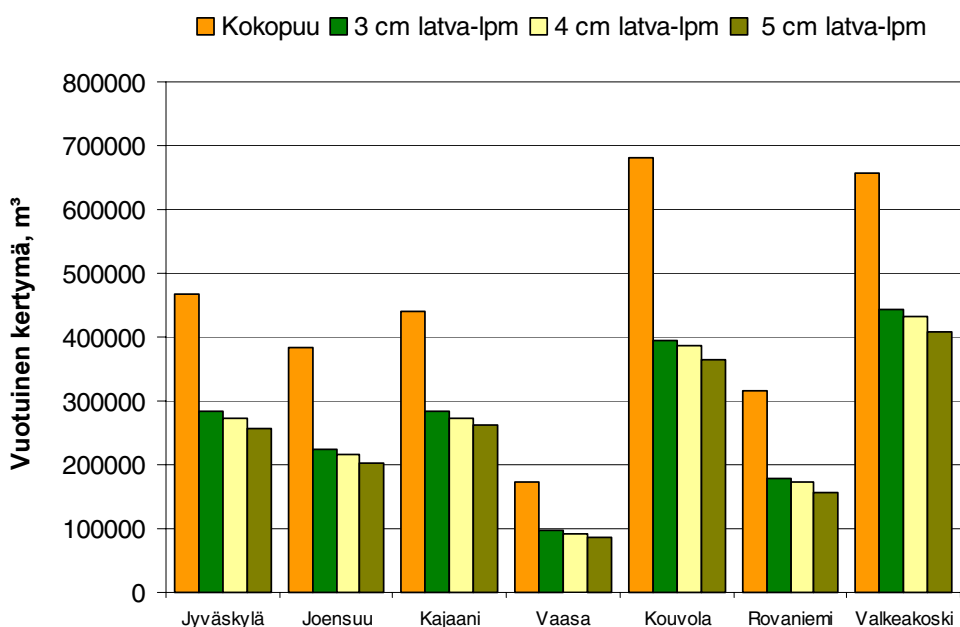
4.3 Karsitun energiapuun kertymät maan eri osissa

Laskenta-alueista Valkeakosken ympäristössä pienpuun kertymä oli suurin ja Vaasan ympäristössä pienin (kuva 20). Vaasan ympäristössä kertymä 100 kilometrin säteellä oli eri latvaläpimitoilla 97 000–85 000 m³ vuodessa ja Valkeakosken alueella 440 000–407 000 m³ vuodessa. Kouvolan ympäristössä kertymät olivat likimain samalla tasolla kuin Valkeakoskella. Jyväskylän ja Kajaanin ympäristössä kertymät olivat 283 000–260 000 m³ vuodessa. Joensuussa kertymä oli 224 000–202 000 m³ ja Rovaniemellä 179 000–157 000 m³ vuodessa.

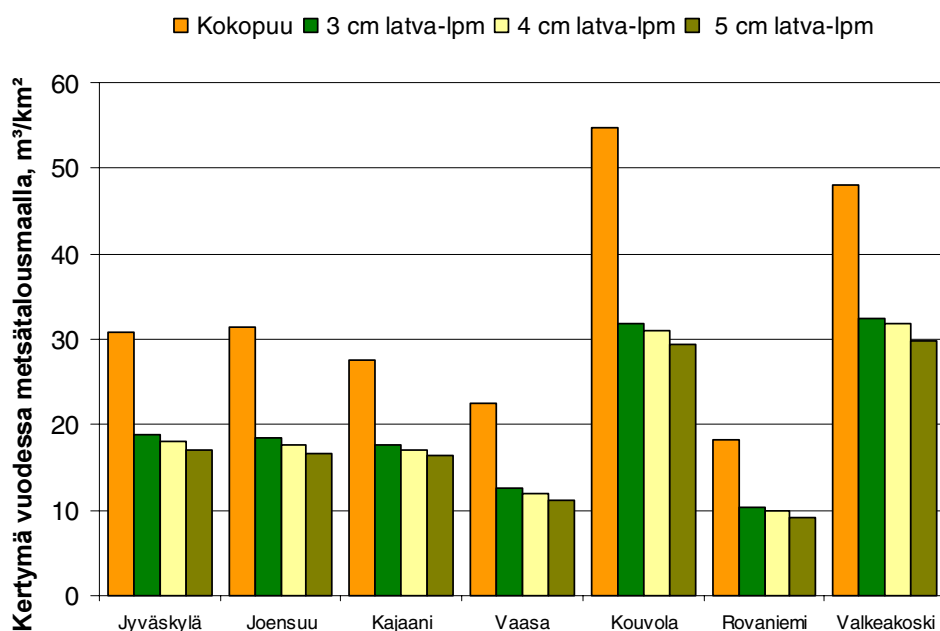
Verrattaessa kokopuun ja rankapuun kertymiä, kokopuuna korjuussa kertymät ovat 50–80 % rankapuun kertymiä suuremmat (kuva 20). Rankana korjuussa kertymä pienenee, kun latvusmassa ja alamittainen latvapuun jäävät metsään. Lisäksi rankana korjuussa energiapuun kertymälle asetettu 25 m³/ha minikoko on selvästi vaikeampi saavuttaa kuin kokopuuna korjuussa, mikä myös osaltaan leikkaa rankapuun alueellisia kertymiä kokopuun kertymiin verrattuna. Rankana korjuussa latvaläpimittavaatimuksen nosto 3 cm:stä 5 cm:iin pienentää rankapuun kertymiä eri laskenta-alueilla 8–12 % (kuva 20).

Kokopuun kertymät kuvassa 20 perustuvat ”Pienpuuhakkeen kustannustekijät ja toimituslogistiikka” hankkeen tuloksiin (Laitila ym. 2004) ja kertymälaskelmassa rajoitteena oli, että korjuukohteella ainespuun kertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja kokopuun kertymän piti olla vähintään 25 m³/ha.

Kuvassa 21 on esitetty vuotuiset energiapuukertymät neliökilometrillä metsämaata. Alueiden väliset vaihtelut kertymässä tasoittuvat hieman mm. vesistöjen vaikutuksen poistuessa.

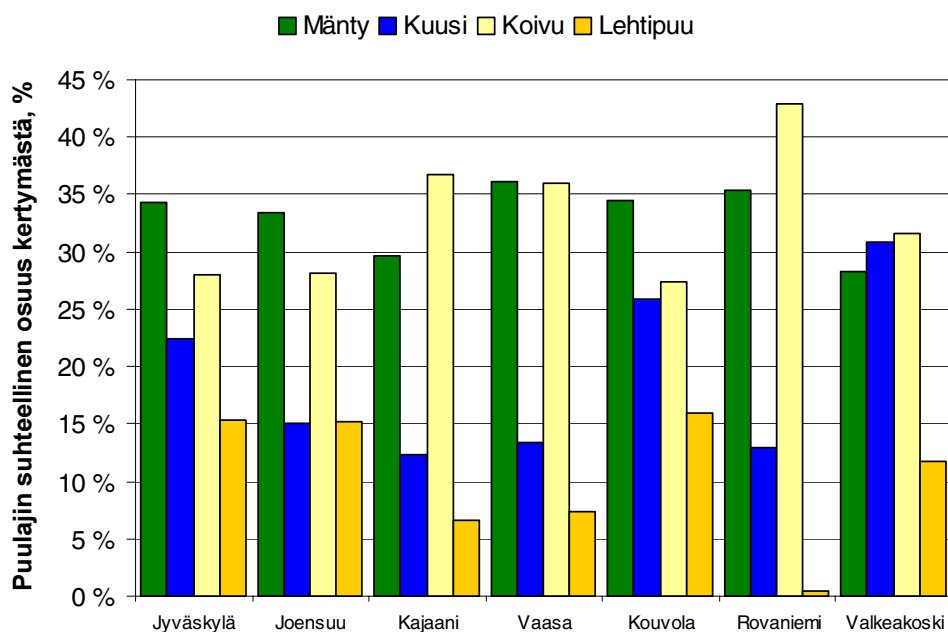


Kuva 20. Kokopuun (Laitila ym. 2004) ja karsitun energiapuun saatavuus maan eri osissa eri minimilatvaläpimitoilla. Kohteilla ainespuukertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja energiapuukertymä vähintään 25 m³/ha.



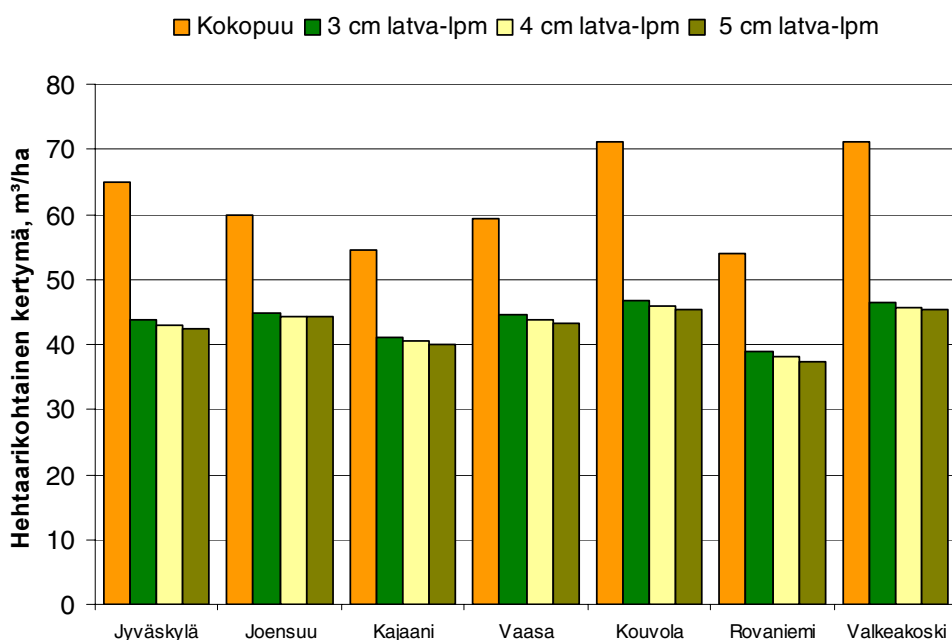
Kuva 21. Kokopuun ja karsitun energiapuun kertymäpotentiaali metsämaan neliökilometriä kohti maan eri osissa eri minimilatvaläpimitoilla.

Koivun osuus karsitun energiapuun kertymästä kasvoi siirryttäessä etelästä pohjoiseen päin ja kuusen osuus vastaavasti väheni (kuva 22). Männyn osuus rankapuun kertymästä oli eri laskenta-alueilla noin 30–35 %. Rankana korjuu lisäsi männyn ja koivun suhteellista osuutta ja vähensi kuusen suhteellista osuutta energiapuun kertymästä kokopuuna (Laitila ym. 2004) korjuuseen verrattuna.



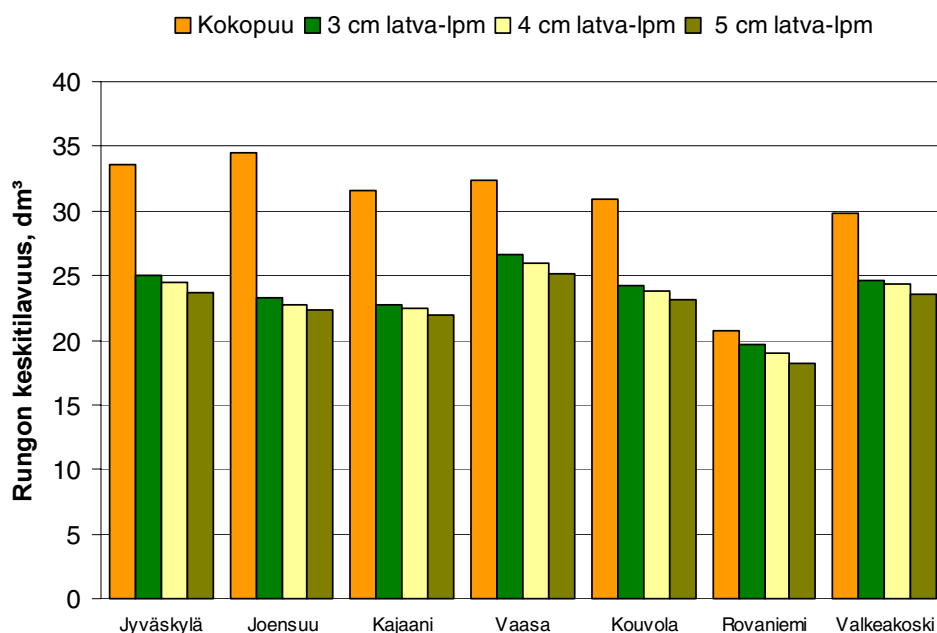
Kuva 22. Puulajien suhteelliset osuudet rankapuun kertymästä maan eri osissa. Minimilatvaläpimita 4 cm.

Rankana korjattavan energiapuun keskimääräiset hehtaarikertymät olivat noin 40 m³/ha ja alueiden välillä ei ollut merkittäviä eroja. Jyväskylässä, Kouvolassa ja Valkeakoskella, missä kuusen osuus kertymästä on kokopuuna korjattaessa 25–30 % (Laitila ym. 2004), rankana korjuu pienensi hehtaarikohtaisia kertymiä 22–25 m³/ha kokopuuna korjuuseen verrattuna (kuva 22). Joensuussa, Kajaanissa, Vaasassa ja Rovaniemellä, jotka ovat mänty ja koivuvaltaisia alueita, energiapuun karsiminen alensi keskimääräistä hehtaarikertymää noin 15 m³/ha. Latvaläpimitan vaikutus karsitun energiapuun keskimääräiseen hehtaarikertymään oli hyvin pieni (kuva 23). Tämä johtuu siitä, että latvakappaleen osuus rangan tilavuudesta on korkeintaan muutamia litroja, kun katkaisuläpimita on 4, 5 tai 6 cm.



Kuva 23. Minimilatvaläpimitan vaikutus rankapuun hehtaarikertymään, m³/ha, maan eri osissa. Kohteilla ainespuukertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja energiapuukertymä vähintään 25 m³/ha.

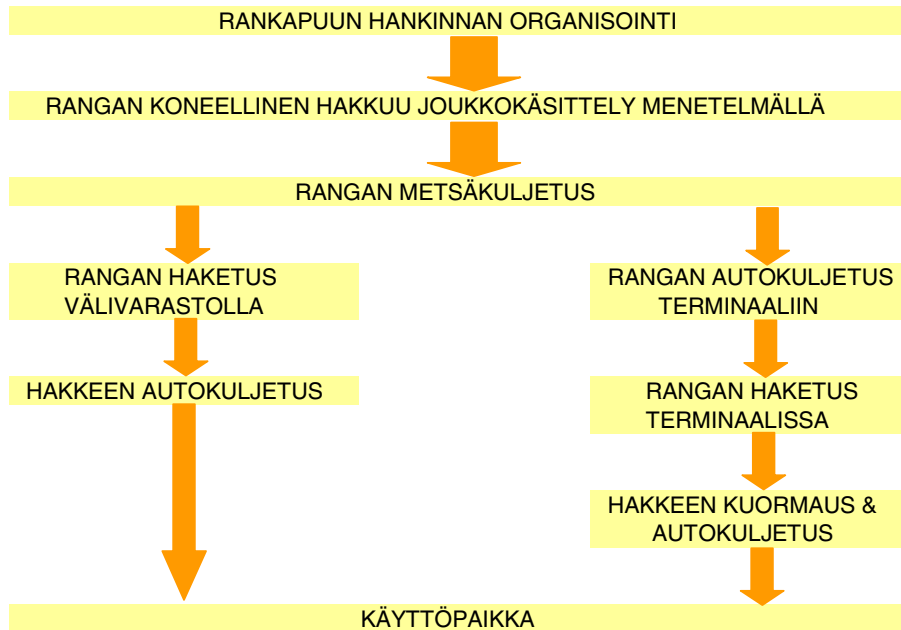
Rangan keskikoko oli nuorissa kasvatusmetsissä Rovaniemen ympäristöä lukuun ottamatta 22–26 litraa. Rovaniemellä rangan keskitilavuus oli latvaläpimitasta riippuen 18–19,5 litraa (kuva 24). Verrattaessa kokopuuna korjattavan ja rankana korjattavien runkojen keskitilavuuksia ero on yllättävän pieni. Ennakkoon arvioitua pienempi kokoero selittyy sillä, että rangan pituudelle asetettu 3 tai 5 metrin vähimmäispituus, 3, 4 ja 5 cm:n latvaläpimittavaatimus yhdessä 25 m³/ha vähimmäiskertymän kanssa rajaavat pienipuustoiset kohteet kokonaan kertymälaskelman ulkopuolelle.



Kuva 24. Minimilatvaläpimitan vaikutus rangan keskikokoon maan eri osissa. Kohteilla ainespuukertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja energiapuukertymä vähintään 25 m³/ha.

5 Työvaiheiden osuus rankahakkeen käyttöpaikkahinnasta eri haketusmenetelmillä

Rankahakkeen käyttöpaikkahinnan kustannusrakenne selvitettiin välivarasto- ja terminaali-haketuksen perustuvilla ketjuilla (kuva 25). Välivarastohaketusjärjestelmä on hakkeen tuotannon perusratkaisu, joka soveltuu sekä pienille että suurille käyttöpaikoille. Haketus tehdään yleensä kuorma-autoalustaisilla tai maataloustraktorisovitteisilla hakkureilla ja materiaali haketetaan vieressä odottavan hakeauton kuormatilaan. Hakkurin ja hakeauton toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa mikä merkitsee sitä, ettei haketusta ja kuljetusta voi limittää (Asikainen ym. 2001). Kaukokuljetusmatka riippuen odotusaikoja tulee joko hakkurille tai hakeautolle. Käytettäessä useampia hakeautoja hakkurin odotusaikoja voidaan vähentää, mutta silloin hakeautojen odotusajat saattavat kasvaa. Tämä ns. ”kuumaketju” on altis keskeytyksille. Välivarastohaketusmenetelmässä auton kantavuus ja kuormakoko saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti ja menetelmä on kuljetustehokas myös pitkillä kaukokuljetusmatkoilla.



Kuva 25. Rankahakkeen toimitusketjujen eri työvaiheet.

Terminaalihaketus tapahtuu hakkeen käyttöpiirteen läheisyydessä sijaitsevassa terminaalissa, jonne hakepuut ajetaan kuorma-autoilla tai järeillä traktoreilla metsävarastoista. Terminaalihaketuksessa käytetään samantyyppistä kalustoa kuin välivarastohaketuksessa. Haketus-terminaali on prosessinhallinnan väline. Terminaalia voidaan käyttää hakepuun ja hakkeen puskurivarastona, josta haketta voidaan syöttää erikokoisiin käyttöpierteisiin. Yhteen paikkaan keskitetty haketus mahdollistaa myös suuret vuosituotokset ja siten myös edullisemmat kustannukset kuin menetelmässä, jossa hakkureita siirretään tienvarsivarastolta toiselle. Haketerminaalit voivat olla esimerkiksi turvetuotantoalueiden yhteydessä, jolloin kuormauskalustoa on aina saatavilla. Turvetuotantoalueella on myös valmiiksi rakennetut tiet raskasta kalustoa varten (Verkasalo 1987, Toivonen 1998, Lehtoranta 1999, Hakkila 2004).

Terminaalissa haketustyön organisointi on helpompaa, koska työmaasiirtoja ei ole, huollot ja korjaukset ovat helposti järjestettävissä samoin kuin säännölliset haketoimitukset. Hakkeen laatua on myös helppo kontrolloida, koska terminaalia voidaan käyttää hakepuun kuivatuspaikkana, ja kuivaa ja kosteaa hakepuuta voidaan tarvittaessa sekoittaa. Huonoina puolina terminaalihaketuksessa on suuri varastotilan tarve, maapohjan kantavuus ja kunnossapidon tarve etenkin kelirikkoaikana sekä kuljetuskustannukset, jos hakkeen toimituspisteitä on useita ja hakepuuta ja haketta joudutaan kuljettamaan ristiin. Hakkeen ja hakepuun käsittely moneen kertaan lisää terminaalivaiheiden kustannuksia. Terminaalin korkeat rakentamiskustannukset, kuten teiden rakentaminen, mahdollinen kentän asfaltointi ja maaperän kantavuuden parantaminen, edellyttävät korkeaa ympärivuotista käyttöastetta (Verkasalo 1987, Toivonen 1998, Nousiainen ym. 1995, Lehtoranta 1999, Hakkila 2004).

5.1 Laskentaperusteet

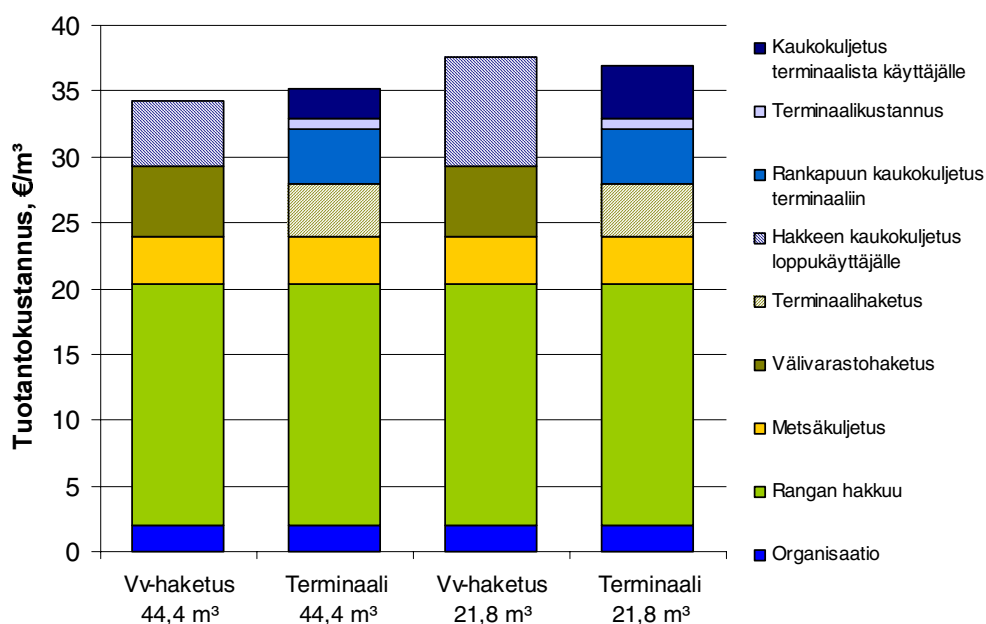
Rankahakkeen työvaiheittainen kustannusrakennelaskelma perustui esimerkkileimikkoon, jossa karsitun energiapuun kertymä oli 40 m³/ha, rangan keskikoko 30 dm³, metsäkuljetusmatka 200 metriä ja kaukokuljetusmatka 40 km. Rankahakkeen yleiskustannuksiksi eli lähinnä organisaatiokuluiksi oletettiin 2 €/m³. Karsitun energiapuun hakkuu tapahtui koneellisesti joukkokäsittelymenetelmällä. Hakkuukoneen tuntikustannus oli 70 €/h ja koneen tuottavuus perustui luvussa 2.4.2 esitettyihin tuottavuusfunktioihin. Tehotuntituottavuus muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,3. Rangan metsäkuljetuksen tuottavuus perustui pitkän kuitupuun metsäkuljetuksen tuottavuuteen harvennushakkuulla (Kuitto ym. 1994). Metsäkuljetuksen tehoajanmenekki muutettiin käyttötuntituottavuudeksi kertoimella 1,2. Laskelmassa metsäkuljetuksen kuormakoko oli 9 m³ ja ajokoneen tuntikustannus 50 €/h.

Välivarastohaketuksen kustannus oli 5,3 €/m³ ja terminaalihaketuksen kustannus 3,9 €/m³. Välivarastolla tehty rankahake kuljetettiin täysperävaunuyhdistelmällä, jonka kuormakoko oli 44,4 m³ tai neliakselisella hakeautolla (nuppikuorma), jonka kuormakoko oli 21,8 m³. Täysperävaunuyhdistelmän ajotuntikustannus oli 76 €/h ja kuormaus- & purkukustannus 53 €/h. Yhdistelmän kuormausaika oli 1,3 tuntia ja purkuaika 0,6 tuntia. Neliakselisen hakeauton ajotuntikustannus oli 58,4 €/h ja kuormaus- & purkukustannus 44,8 €/h. Vetoauton kuormausaika oli 0,6 tuntia ja purkuaika 0,25 h. Laskelmassa käytettiin kahta hakeautotyyppiä, koska esimerkiksi tilausta metsävarastolla tai hakkeen vastaanottopään rajoitukset, kuten lämpölaitoksen hakesiilon pieni koko, voivat rajoittaa täysperävaunuyhdistelmän käyttöä hakkeen kaukokuljetuksessa.

Rankojen kuljetus terminaalille tehtiin puutavara-autolla, jonka kuormakoko oli 42 m³. Puutavara-auton tuntikustannus oli 75 €/h ja kuormaus- & purkukustannus 52 €/h. Rankakuorman kuormausaika tienvarsivarastolla oli 0,9 tuntia ja purkuaika terminaalilla 0,5 tuntia. Terminaalista hake kuljetettiin käyttäjälle täysperävaunuyhdistelmällä tai neliakselisella hakeautolla. Hakkeen kuormauskustannus terminaalilla hakeautoihin oli 0,8 €/m³ ja kuormauksen käyttötuntituottavuus 120 m³/h. Täysperävaunuyhdistelmän ja neliakselisen hakeauton ajotuntikustannukset, kuormaus- & purkukustannukset, kuormakoot sekä purkuajat käyttöpaikalla olivat samat kuin välivarastolla haketetun hakkeen kaukokuljetuksessa. Laskelmassa kaukokuljetusmatka terminaalista käyttöpaikalle oli 10 km.

5.2 Tulokset

Rankahakkeen tuotantokustannukset käyttöpaikalle toimitettuna olivat menetelmästä ja hakkeen kaukokuljetuksen kuormakoosta riippuen 34,2–37,6 €/m³ (kuva 26). Välivarastohaketusmenetelmä oli terminaalihaketusketjua edullisempi menetelmä, kun hakkeen kaukokuljetuksen kuormakoko oli 44,4 m³. Ero terminaalij- ja välivarastohakkeen tuotantokustannuksissa oli 1 €/m³. Jos hake kuljetettiin käyttöpaikalle pelkällä vetoautolla, jonka kuormakoko oli 21,8 m³, terminaalihakkeen tuotantokustannukset olivat 0,7 €/m³ pienemmät kuin välivarastolla haketetun hakkeen.

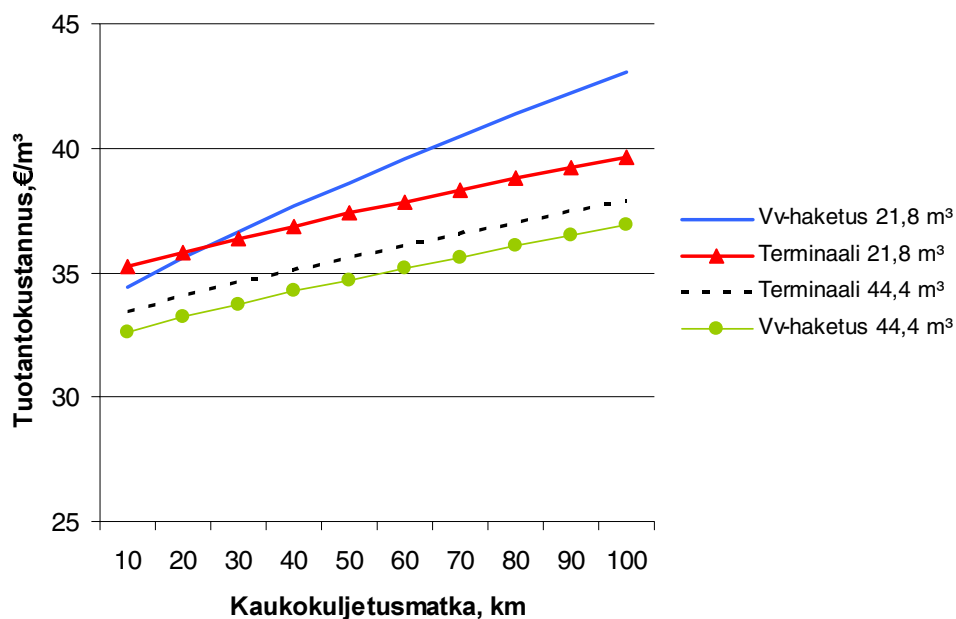


Kuva 26. Työvaiheiden osuudet rankahakkeen tuotantokustannuksista välivarasto- ja terminaali-haketusmenetelmillä, kun hake toimitetaan käyttöpaikalle kaukokuljetuskalustolla, jonka kuormakoko on 44,4 tai 21,8 m³.

Esimerkkityömaalla kallein työvaihe oli rangan hakkuu, jonka osuus tuotantokustannuksista oli 18,3 €/m³. Metsäkuljetuksen kustannus oli 3,7 €/m³. Kaukokuljetusmatkan ollessa 40 km, välivarastolla haketun hakkeen kuljetuskustannus oli täysperävaunu yhdistelmällä 4,9 €/m³ ja pelkällä vetoautolla 8,3 €/m³. Samalla kuljetusmatkalla rangan kaukokuljetus maksoi puutavara-autolla 4,3 €/m³. Hakkeen kuljetus terminaalista käyttöpaikalle maksoi täysperävaunu yhdistelmällä 2,2 €/m³ ja pelkällä vetoautolla 3,9 €/m³, kun terminaalin ja käyttöpaikan välinen etäisyys oli 10 km.

Kuljetuksen tuottavuuteen ja siten myös kustannuksiin vaikuttavia asioita ovat kuorman kuljetukseen käytettävä aika ja kuorman koko sekä kuorman noutoon ja purkuun liittyvien toimintojen onnistuminen. Näihin vaikuttavat mm. kuljetuskaluston kyky liikkua ahtaissa varastopaikoissa, kuorman täytön nopeus, kuorman tiiviys, joustava purkuvuoron saanti, kuormanpurkulaitteiden ja purkupaikan järjestelyjen yhteensopivuus sekä näytteenoton sujutus. Kaikissa kuljetukseen vaiheissa voi esiintyä normaalia poikkeavia tilanteita ja tekijöitä, jotka lisäävät kustannuksia kuljetusaikaa lisäämällä tai siten, että kapasiteettia ei täysin hyödynnetä (Ranta ym. 2002).

Esimerkkilaskelman perusteella, kun hakkeen kaukokuljetukseen käytettiin täysperävaunu yhdistelmää, välivarastohaketusketju oli edullisin rankahakkeen tuotantomenetelmä kaikilla kuljetusmatkoilla (kuva 27). Kun hakkeen kaukokuljetukseen käytettiin pelkkää vetoautoa, välivarastohaketusketju oli edullisin rankahakkeen tuotantomenetelmä 25 km asti, jonka jälkeen terminaali-haketusmenetelmä oli edullisin menetelmä.



Kuva 27. Rankahakkeen tuotantokustannus käyttöpaikalle toimitettuna eri kaukokuljetusmatkoilla väli-varasto- ja terminaalihaketusmenetelmillä, kun hake toimitetaan käyttöpaikalle kaukokuljetuskalustolla, jonka kuormakoko on 44,4 tai 21,8 m³. Ranka toimitetaan terminaaliin autolla, jonka kuormakoko on 42 m³.

6 Olosuhdetekijöiden vaikutus karsitun energiapuun korjuukustannuksiin

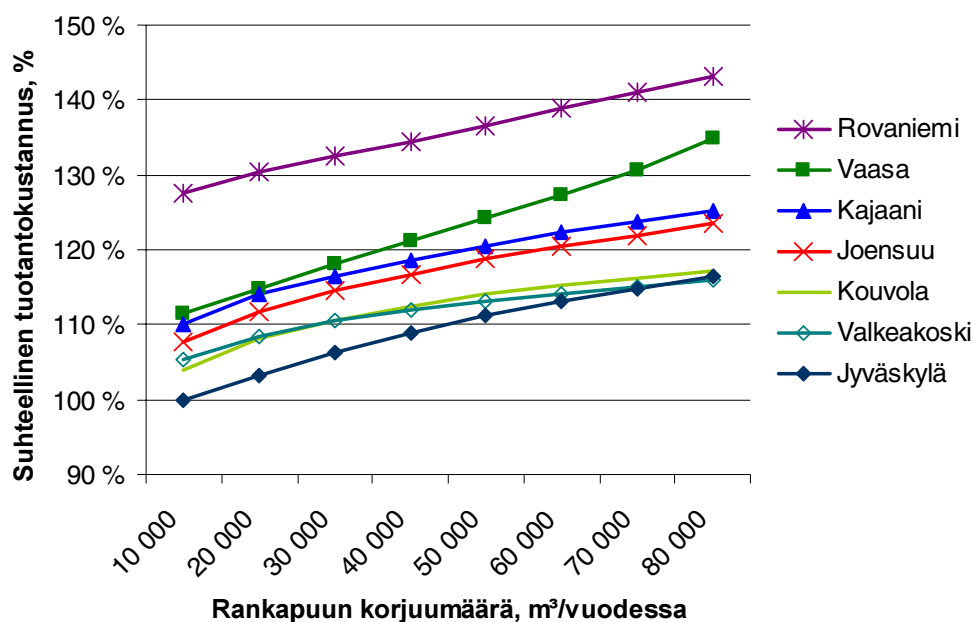
Korjuuolosuhteet maan eri osissa vaihtelevat voimakkaasti korjattavissa olevan puumäärän, puulajisuhteiden, rungon tilavuuden, työmaan koon sekä tiestön, vesistöjen ja peltojen tiheyden mukaan.

6.1 Korjuukustannukset maan eri osissa

Rankapuun korjuukustannukset laskettiin seitsemälle maan eri osissa sijaitsevalle käyttöpaikalle: Jyväskylä, Joensuu, Kouvola, Valkeakoski, Kajaani, Vaasa ja Rovaniemi. Laskentaineistona oli VMI 8 ja 9:n puusto- ja kertymätiedot, metsäyhtiöiden leimikkotietojen perusteella lasketut kuntakohtaiset metsäkuljetuksen keskikuljetusmatkat (Laitila ym. 2004, Asikainen ym. 2001), sekä karsitun energiapuun korjuun työvaiheiden tuottavuus ja kustannusfunktiot. Kaukokuljetusmatkat käyttöpaikalle laskettiin kuntakohtaisina keskiarvoina ko. kunnan ainespuu leimikoiden sijaintitietojen perusteella. Leimikoiden paikkatietotarkastelu tehtiin karttaohjelmalla ja kuljetusmatkat laskettiin 100 km säteellä tieverkkoa pitkin (Laitila ym. 2004, Asikainen ym. 2001). Laskelmassa rangan minimilatvaläpimita oli 4 cm ja rangan pituus oli joko 3 tai 5 metriä.

Korjuukustannukset laskettiin välivarastohaketukseen perustuvalla ketjulla. Korjuukustannusten laskentaperusteet olivat samat kuin luvussa 5.1 esitetyt. Kaukokuljetuksen kuormakoko oli 44,4 m³ rankahaketta, ja koneiden käyttötuntikustannukset pysyivät vakiona eri hankintamäärillä. Kustannukset laskettiin hankinta-alueen kuntiin jokaiselle VMI-koelalle/laskentakuvioille ja järjesteltiin taulukkolaskentaohjelmassa hankintakustannusten mukaan pienimmästä suurimpaan. Lopullisissa tuloksissa keskihinnat käyttöpaikalla ilmaistiin suhteellisina lukuina. Jyväskylän käyttöpaikalla suhdeluku oli 100 %, kun vuotuinen hankintamäärä oli 10 000 m³ rankahaketta.

Verrattaessa maan eri osia keskenään, Jyväskylässä tuotantokustannukset olivat pienimmät (kuva 28). Rankahakkeen vuotuisen korjuumäärän noustessa 60 000 m³:iin Valkeakosken ja Kouvolan tuotantokustannukset olivat samalla tasolla Jyväskylän kanssa. Joensuussa rankahakkeen tuotantokustannukset olivat hieman pienemmät kuin Kajaanissa. Vaasassa, missä hankinta-alue on puolimyrän muotoinen, hankintamäärien lisäys nosti korjuukustannuksia jyrkästi. Hankintamäärien kasvaessa korjuu oli ulotettava entistä epäedullisemmille kohteille ja yhä kauemmas käyttöpaikasta. Rovaniemellä rankahakkeen tuotantokustannukset olivat korkeimmat. Ero kalleimman ja halvimman alueen tuotantokustannuksissa oli noin 26 %. Hankintamäärien kasvattaminen 10 000 m³:stä 80 000 m³:iin nosti tuotantokustannuksia keskimäärin 11–16 %. Vaasassa tuotantokustannukset nousivat 23 %.

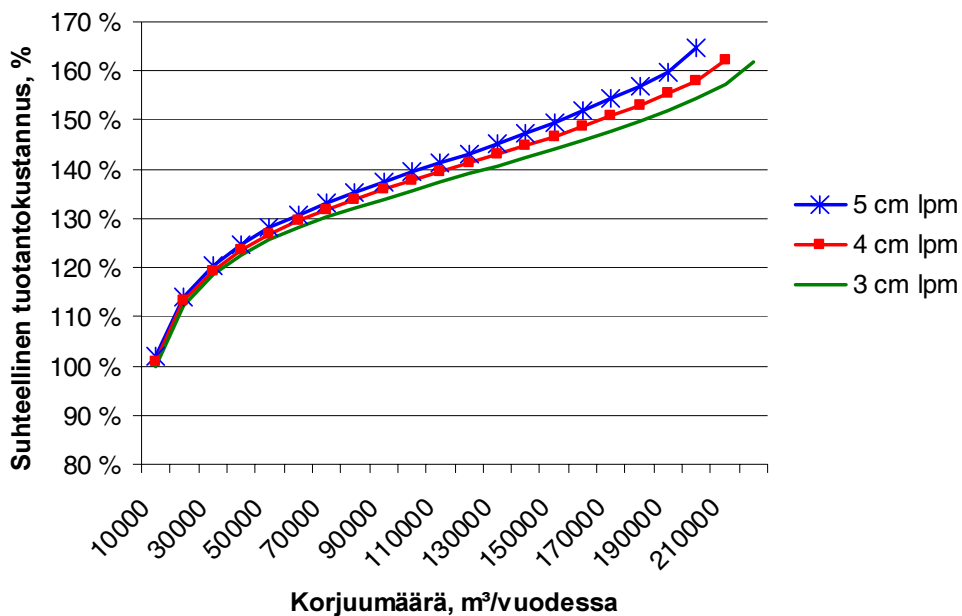


Kuva 28. Rankahakkeen suhteelliset tuotantokustannukset maan eri osissa. Jyväskylässä tuotantokustannukset 100 %, kun vuotuinen korjuumäärä on 10 000 m³.

6.2 Latvaläpimitan vaikutus tuotantokustannuksiin

Latvaläpimitan vaikutusta karsitun energiapuun käyttöpaikkahintaan vertailtiin Joensuun käyttöpaikalla. Korjuukustannukset laskettiin vaihtoehdoille, joissa ranka katkaistiin joko 3, 4 tai 5 cm kohdalta. Latvaläpimitan ollessa 3 cm vuotuinen kertymä 100 km säteellä Joensuusta oli 224 000 m³. Katkaisukohdan siirto 4 cm kohdalle laskee kertymän 215 000 m³:iin ja 5 cm latvaläpimitalla kertymä oli 202 000 m³/vuodessa. Rungon keskikoko oli 3 cm latvaläpimitalla 23,3 dm³, 4 cm latvaläpimitalla 22,8 dm³ ja 5 cm latvaläpimitalla 22,3 dm³. Hehtaarikohtainen rankapuun kertymä oli 3 cm latvaläpimitalla 44,9 m³/ha, 4 cm latvaläpimitalla 44,3 m³/ha ja 5 cm latvaläpimitalla 44,2 m³/ha. Minimilatvaläpimita näytti vaikuttavan vähän kertymäpotentiaaliin. Tämä johtui osittain siitä, että korjaamatta jäävien latvakappaleiden tilavuus sovelletuilla minimilatvaläpimitoilla oli ylipäätään pieni. Latvaläpimitan vaikutusta kertymäpotentiaaliin vähensi hieman myös energiapuulle laskennassa sovelletut pituusvaatimukset. Korjuukustannukset laskettiin välivarastohaketukseen perustuvalla ketjulla ja hakkeen kaukokuljetuksen kuormakoko oli 44,4 m³. Rankahakkeen tuotantokustannukset ilmaistiin suhteellisina lukuina. Latvaläpimitan ollessa 3 cm ja hankintamäärän 10 000 m³/vuodessa suhteellinen tuotantokustannus oli 100 %.

Latvaläpimitan vaikutus tuotantokustannuksiin oli pieni (kuva 29). Vuotuisen hankintamäärän ollessa 90 000 m³, latvaläpimitan nosto 3 cm:stä 4 cm:iin nosti tuotantokustannuksia 1,8 %. Minimilatvaläpimitan siirtyminen 4 cm:stä 5 cm:iin nosti tuotantokustannuksia edelleen 1,5 %.



Kuva 29. Rankahakkeen suhteelliset tuotantokustannukset Joensuun käyttöpaikalla eri minimilatvaläpimitoilla.

6.3 Kokopuuna ja rankana korjuun vaikutus tuotantokustannuksiin eri leimikonvalintakriteereillä

Kouvolan, Vaasan ja Jyväskylän käyttöpaikoilla verrattiin eroja tuotantokustannuksissa ja kertymissä, kun harvennusemetsien pienpuuta korjattiin pelkästään kokopuuna tai karsittuna rankana tai energiapuuta toimitettiin käyttöpaikalle sekä rankana että kokopuuna. Samalla tarkasteltiin eri leimikonvalintakriteerien vaikutusta tuotantokustannuksiin ja energiapuun saatavuuteen em. käyttöpaikoilla.

6.3.1 Laskentaperusteet

Kertymälaskelmassa ehtona oli että ainespuukertymä korjuukohteilla oli enintään 25 m³/ha ja energiapuukertymä piti olla vähintään 25 m³/ha. Rangan minimiläpimittana oli 4 cm ja rangan pituus sai olla joko 3 tai 5 metriä.

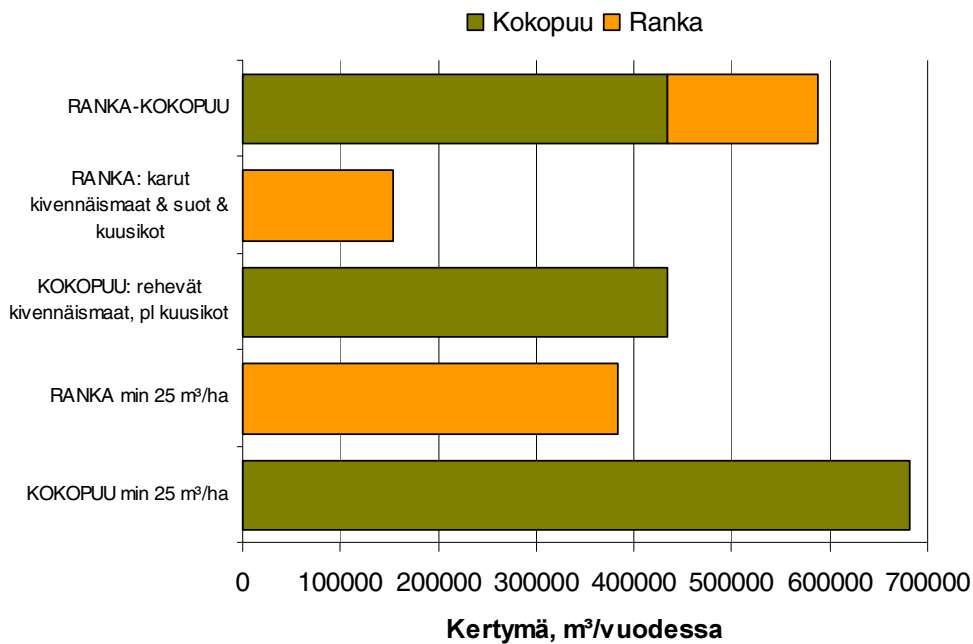
Aines- ja energiapuun kertymärajoitteiden lisäksi energiapuun saatavuutta rajoitettiin leimikonvalintakriteerien avulla. Kokopuuna korjuussa tarkasteltiin vaihtoehtoa, jossa energiapuuta korjattiin pelkästään kivennäismaan korjuukohteilta, jossa kasvupaikkatyyppejä oli vähintään MT ja kuusi ei ollut vallitsevana puulajina. Toisena tarkasteltava vaihtoehtona oli tapaus, jossa energiapuuta korjattiin kokopuuna em. kivennäismaan korjuukohteilta ja muilta kohteilta energiapuuta otettiin talteen karsittuna. Rankana korjattavia kohteita olivat kaikki turvemaat, kuusivaltaiset nuoret metsät sekä kivennäismaat, joissa kasvupaikkatyyppejä oli VT tai sitä karumpi.

Korjuukustannukset laskettiin välivarastohaketukseen perustuvalla ketjulle, jossa hakeauton kuormakoko oli 44,4 m³. Muutoin kustannuslaskelmassa käytettiin luvussa 5.1 mainittuja laskentaperusteita.

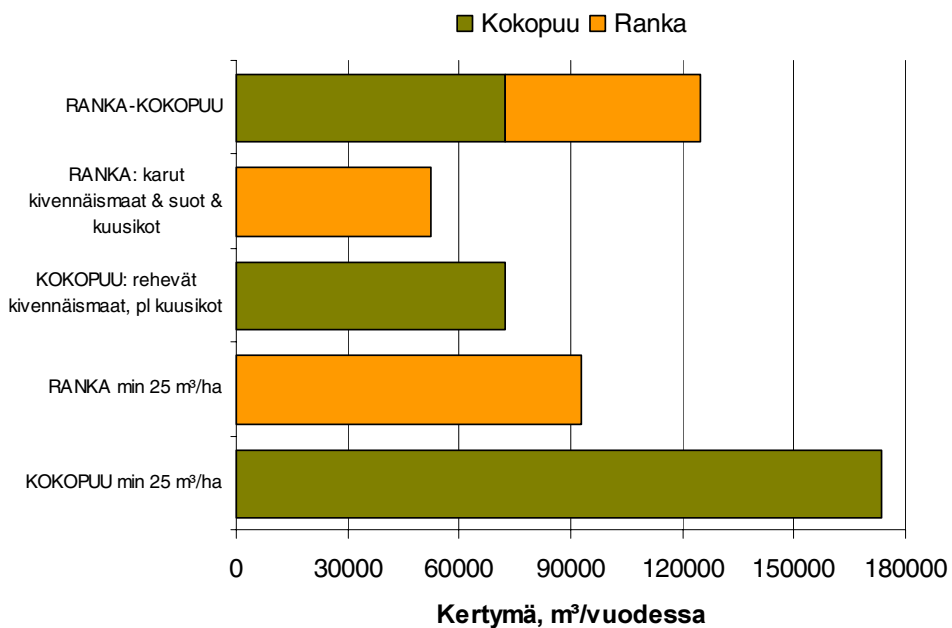
6.3.2 Hakkuutavan ja rajoitteiden vaikutus kertymäpotentiaaliin

Kouvolan käyttöpaikalla energiapuun kertymäpotentiaali oli kokopuuna korjattaessa 680 000 m³/vuodessa (kuva 30). Rankana korjattaessa kertymäpotentiaali tippui 384 000 m³:iin vuodessa. Kun energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta, kertymäpotentiaali oli 434 000 m³/vuodessa. Vaihtoehdossa (RANKA-KOKOPUU), jossa energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta ja rankana karuilta kivennäismailta, soilta sekä kuusivaltaisista metsistä, kertymäpotentiaali oli 590 000 m³/vuodessa.

Vaasan käyttöpaikalla energiapuun kertymäpotentiaali oli kokopuuna korjattaessa 173 000 m³/vuodessa (kuva 31). Rankana korjattaessa kertymäpotentiaali tippui 93 000 m³:iin vuodessa. Kun energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta, kertymäpotentiaali oli 72 000 m³/vuodessa. Vaihtoehdossa (RANKA-KOKOPUU), jossa energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta ja rankana karuilta kivennäismailta, soilta sekä kuusivaltaisista metsistä, kertymäpotentiaali oli 125 000 m³/vuodessa.

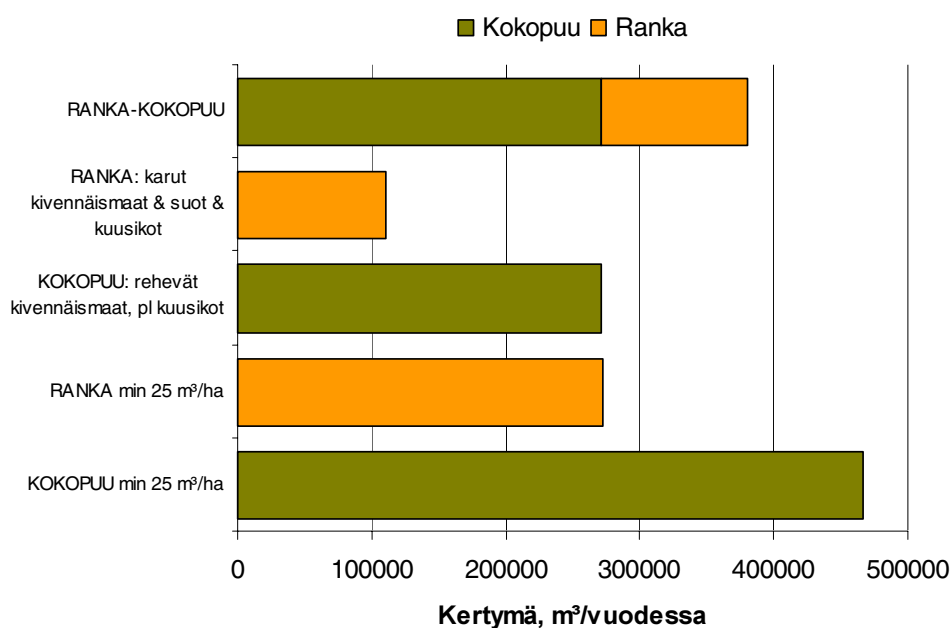


Kuva 30. Nuorten metsien energiapuupotentiaali Kouvolan käyttöpaikalla, kun harvennuspuuta korjataan joko karsittuna tai karsimattomana tai kun korjuutapoja rajoitetaan leimikon valintakriteerien avulla.



Kuva 31. Nuorten metsien energiapuupotentiaali Vaasan käyttöpaikalla, kun harvennuspuuta korjataan joko karsittuna tai karsimattomana tai kun korjuutapoja rajoitetaan leimikon valintakriteerien avulla.

Jyväskylän käyttöpaikalla energiapuun kertymäpotentiaali oli kokopuuna korjattaessa 467 000 m³/vuodessa (32). Rankana korjattaessa kertymäpotentiaali tippui 272 000 m³:iin vuodessa. Kun energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta, kertymäpotentiaali oli 270 000 m³/vuodessa. Vaihtoehdossa (RANKA-KOKOPUU), jossa energiapuuta korjattiin kokopuuna reheviltä kivennäismailta ja rankana karuilta kivennäismailta, soilta sekä kuusivaltaisista metsistä, kertymäpotentiaali oli 380 000 m³/vuodessa.



Kuva 32. Nuorten metsien energiapuupotentiaali Jyväskylän käyttöpaikalla, kun harvennuspuuta korjataan joko karsittuna tai karsimattomana tai kun korjuutapoja rajoitetaan leimikon valintakriteerien avulla.

6.3.3 Hakkuutavan ja leimikkorajoitteiden vaikutus tuotantokustannuksiin

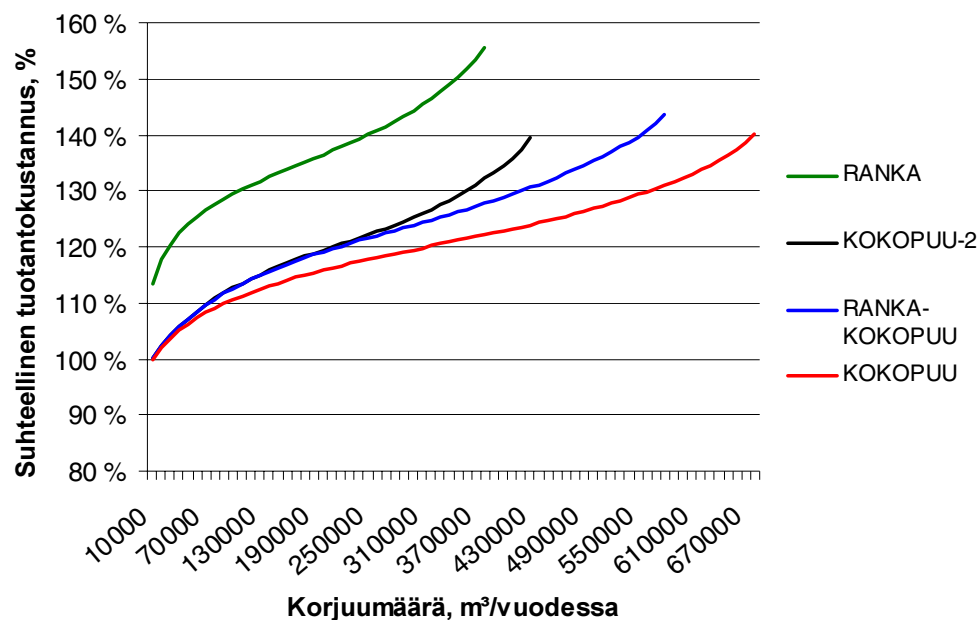
Laskelmassa, jossa verrattiin hakkuutavan ja leimikkorajoitteiden vaikutusta hankintakustannuksiin, tuotantokustannukset ilmaistiin suhteellisina lukuina. Tuotantokustannus oli 100 %, kun vuotuinen korjuumäärä oli 10 000 m³ ja harvennuseksien energiapuuta korjattiin kokopuuna.

Kuvien 33–35 selitteissä termi KOKOPUU tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa energiapuuta otetaan talteen oksineen. KOKOPUU-2-termi tarkoittaa puolestaan vaihtoehtoa, jossa kokopuuna korjuu on rajattu kivennäismaille, joilla kasvupaikkatyyppi on vähintään MT ja kuusi ei ole vallitseva puulaji. RANKA-termi tarkoittaa vaihtoehtoa, jossa energiapuuta karsitaan ja minimiläpimittana on 4 cm. RANKA-KOKOPUU-termi tarkoittaa puolestaan tilannetta, jossa kokopuuna korjuu on rajattu kivennäismaille, joilla kasvupaikkatyyppi on vähintään MT ja kuusi ei ole vallitseva puulaji. Rankana korjattavia kohteita RANKA-KOKOPUU-vaihtoehdossa ovat kaikki turvemaat, kuusivaltaiset nuoret metsät sekä kivennäismaat, joissa kasvupaikkatyyppi on VT tai sitä karumpi.

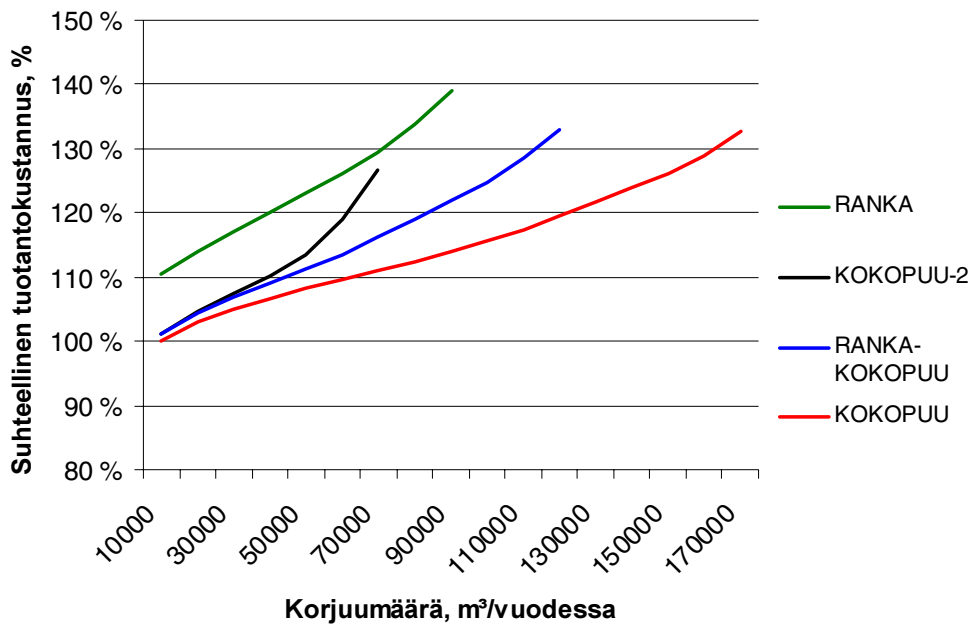
Kokopuuna korjuu oli edullisin vaihtoehto kaikilla tarkastelussa mukana olleilla käyttöpaikoilla. Kouvolan käyttöpaikalla (kuva 33) rankana korjuun ja kokopuuna korjuun välinen ero tuotantokustannuksissa oli 19 %, kun hankintamäärä oli 90 000 m³ vuodessa. Vaasassa (kuva 34) ero oli 25 % ja Jyväskylässä 17 % (kuva 35). Ero selittyy karsitun energiapuun hakkuun korkeammilla kustannuksilla sekä sillä, että rangalla korjuu on ulotettava laajemmalle alueelle tai vaikeammille korjuukohteille, jotta saadaan sama energiapuumäärä kuin kokopuuna korjuussa.

Verrattaessa vaihtoehtoja, jossa kokopuuna korjuu rajattiin pelkästään reheville kivennäismaille tai että energiapuuta korjattiin sekä rankana että kokopuuna, erot tuotantokustannuksissa olivat pienet, joskin alueiden välillä oli huomattavaa vaihtelua (kuvat 33–35).

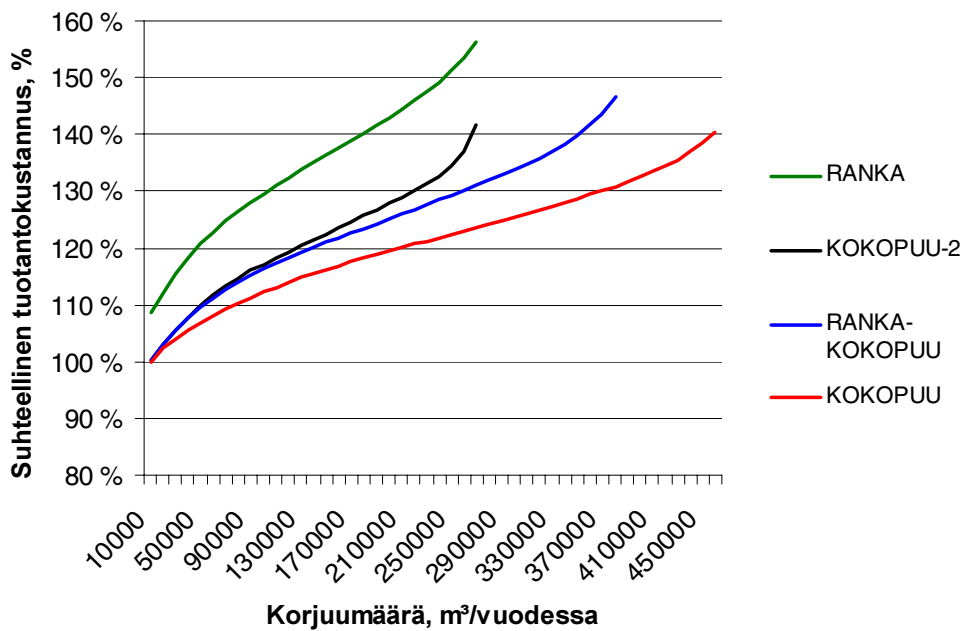
Kouvolassa, kun vuotuinen pienpuuhakkeen korjuumäärä oli 90 000 m³, RANKA-KOKOPUU- ja KOKOPUU-2-korjuuvaihtoehtojen tuotantokustannukset olivat täsmälleen samalla tasolla (kuva 33). Vaasan ympäristössä, missä turvemaiden osuus metsäpinta-alasta on merkittävä, RANKA-KOKOPUU-vaihtoehdon tuotantokustannukset olivat 70 000 m³ vuotuisella hankintamäärällä 11 % KOKOPUU-2-vaihtoehtoa pienemmät. Vaasan ympäristössä rehevien kivennäismaiden osuus nuorten metsien pinta-alasta on niin pieni, että 70 000 m³ on suurin mahdollinen hankintamäärä kokopuuna korjuussa (kuva 34). Jyväskylän käyttöpaikalla, hankintamäärän ollessa 90 000 m³ vuodessa, energiapuun korjuu sekä rankana että kokopuuna oli 1 % verran edullisempi vaihtoehto, kuin että energiapuuta korjattaisiin pelkästään kokopuuna reheviltä kivennäismailta (kuva 35).



Kuva 33. Pienpuuhakkeen tuotantokustannukset eri korjuutavoilla ja leimikonvalintakriteereillä Kouvolassa.



Kuva 34. Pienpuuhakkeen tuotantokustannukset eri korjuutavoilla ja leimikonvalintakriteereillä Vaasassa.



Kuva 35. Pienpuuhakkeen tuotantokustannukset eri korjuutavoilla ja leimikonvalintakriteereillä Jyväskylässä.

7 Karsitun energiapuun mittauss joukkokäsittelyharvesterilla

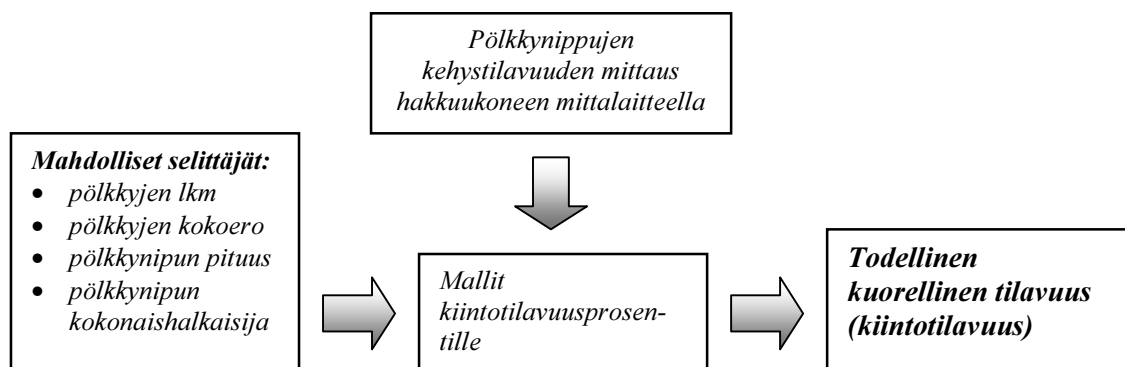
Hakkuukonemittaus on puutavaran mittauksen valtamenetelmä. Sen osuus markkinahakkuiden kaikesta mitatusta puutavarasta on noin 70 % (Hujo 2004). Vuosittaisena hakkuukoneilla mitattuna puumääränä tämä tarkoittaa liki 40 milj. m³:ä.

Rungoittain yksinkappalein tehtävässä hakkuussa yksioteharvestereilla voidaan luotettavasti mitata pölkkykohtaiset ja edelleen tavaralaji- ja eräkohtaiset todelliset kuorelliset tilavuudet eli kiintotilavuudet. Sen sijaan joukkokäsittelytekniikoille ei toistaiseksi ole olemassa mittaamenetelmää. Edellytyksenä mittausten kehittämiseksi ja käyttöönotolle on riittävä mittaustarkkuus erä- ja tavaralajikohtaisesti.

7.1 Tutkittava mittaussmenetelmä

Hakkuukonemittauksessa karsintaterät myötäilevät karsinnan aikana rungon pintaa ja mittaavat samalla läpimittahavainnoja, joista muodostuu runkokäyrä. Samanaikaisesti pituusmittarulla mitataan rungon ja pölkkyjen pituutta. Tilavuuden mittaus tapahtuu pituus- ja läpimittahavainnojen perusteella pätkittäin kuutioimalla katkaistun kartion tai lieriön kaavoilla. Lähtökohtana joukkokäsittelyhakkuussa toteutettavan puutavaran mittauksen tutkimiselle oli hakkuukoneissa olemassa olevien mittalaitteiden ja niiden ominaisuuksien hyödyntäminen.

Mittaussmenetelmän suunnitteluvaiheessa pohdittiin kahta mahdollista menetelmävaihtoehtoa. Ensimmäisessä vaihtoehdossa runkojen tilavuuden keskiarvo ja tavaralajijakauma määräytyi yksinpuin korjattavien ja mitattavien otantarunkojen perusteella. Tällöin kokonaistilavuus oli laskettavissa runkojen kokonaiskappalemäärän perusteella. Toisessa vaihtoehdossa hakkuukoneen mittalaitteen joukkokäsittelyhakkuussa havaitsemat tilavuudet rinnastettiin pölkkyriippujen kehystilavuudeksi. Kehystilavuudet muunnettiin kuorelliseksi kiintotilavuudeksi malleilla laskettujen kiintotilavuusprosenttien perusteella. Tutkimuksessa tarkasteltiin jälkimmäistä vaihtoehtoa. Tutkitun mittaussmenetelmän periaate on esitetty kuvassa 36.



Kuva 36. Tutkitun mittaussmenetelmän kaaviokuva.

7.2 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tutkimuksen kenttäkokeet suunniteltiin yhteistyössä Outokummun Metalli Oy:n ja Timberjack Oy:n kanssa. Kenttäkokeiden koehakkuut toteutti Motopuu Oy, jolla oli käytössään uusi peruskone ja Outokummun Metalli Oy:n valmistama Timberjack 745 hakkuulaite joukkokäsittelyvarustuksella. Koeleimikko valittiin Osuuskunta Metsäliiton Joensuun piirin puunhankinnan kautta korjuuseen tulleista leimikoista.

Koehakkuu toteutettiin ensiharvennusmännikössä, josta korjattiin sekä aines- että energiapuuta. Poistuman järeimmät rungot oli hakattava rungoittain. Vastaavasti poistuman pienimpiä, kokonaisuudessaan energiapuuksi meneviä runkoja ei ollut tarpeen karsia ja katkoa, jolloin mittaustietoa ei saatu. Joukkokäsittelymenetelmällä korjatut, karsitut pölkkyniput olivat järeydeltään pääosin kuitupuuta. Käytännössä tutkimuksen koerungoiksi valittiin kaikki nämä rungot, joista korjattiin karsittua kuitu- tai energiapuuta joukkokäsittelymenetelmällä. Kokonaisuudessaan aineisto koostui 134 joukkokäsittelystä runkonipusta. Karsittuja ja katkottuja tyvipölkkyrippuja aineistossa oli 134 ja muita pölkkyrippuja 129. Kaikissa koenipuissa oli 2–3 pölkkyä.

Koeaineisto koostui hakkuukoneen mittalaitteen tallentamista tiedostoista ja koepölkkyistä manuaalisesti mitatuista suureista. Hakkuun aikana erilliselle maastotallentimelle kirjattiin mittatietoa harvesterin päätteeltä. Kunkin runkonipun prosessoinnin jälkeen hakkuukoneen mittalaitteelta tallennettiin runkoprofiili ja pölkkykohtaiset tiedot omiksi tiedostoiksi (stm-tiedostot). Näitä tietoja käytettiin pölkkyrippujen kehystilavuuksina.

Mittausmenetelmän kehittämisen kannalta oli olennaista tutkia mahdollisuudet arvioida harvesteriin kerättävien runkojen läpimittoja. Runkojen keskinäisiä kokosuhteita voitiin pitää keskeisinä selittäjinä kiintotilavuusprosenttia selittävässä malleissa. Runkojen joukkokäsittelyyn perustuvassa hakkuutavassa ensimmäisen kaadetun rungon läpimitta voitiin mitata tarkasti. Toisen ja edelleen seuraavien runkojen kaatosahauksen jälkeen mittalaite osoitti runkojen kokonaisläpimittaa. Ensimmäisen kaatosahauksen jälkeen maastotallentimeen kirjattiin mittalaitteen osoittama rungon kantoläpimitta. Seuraavien runkojen kaatosahauksen jälkeen kirjattiin vastaavasti mittalaitteen osoittama runkonipun kokonaisläpimitta.

Hakkuukoneen mittalaitteen ensimmäinen mittaushavainto saatiin tässä tapauksessa n. 90 cm:n korkeudelta kaatosahauksesta. Mittalaite käytti tyvikartion ja kantoläpimittojen laskentaan runkojen kapenemista (20 mm/m). Näin ollen ensimmäinen todellinen läpimittahavainto oli helposti laskettavissa.

Koerunkojen käsittelyjärjestys merkittiin tyvipölkkyihin. Edelleen tyvipölkkyistä mitattiin manuaalisesti läpimitat 0,9 m:n korkeudelta, mikä mahdollisti hakkuukoneen mittalaitteen havaitseman kokonaisläpimitan ja pölkkyjen läpimittojen välisen yhteyden tutkimisen. Pölkkyrippujen todellinen kuorellinen tilavuus (kiintotilavuus) määritettiin pölkkyttäisellä

saksimittauksella mittaamalla pölkkyjen keskusläpimitat ja pituudet. Näistä suureiden ja keskusmuotolukujen perusteella laskettiin pölkkyjen tilavuudet (Kärkkäinen 1982).

Pölkkyriippujen manuaalisesti mitattujen kiintotilavuuksien ja hakkuukoneella mitattujen kehystilavuuksien perusteella laskettiin kiintotilavuusprosentit. Mahdollisina kiintotilavuusprosentin selittäjinä kokeiltiin pölkkyriippujen pituutta, latvaläpimittaa ja keskusläpimittaa. Mallien laskennassa käytettiin kahden pölkyn koenippuja. Malleilla laskettiin kunkin nipun kiintotilavuusprosentti ja edelleen tätä ja hakkuukoneen mittalaitteen havaitsemaa kehystilavuutta käyttäen todellinen kuorellinen tilavuus. Tätä tilavuutta verrattiin manuaalisesti pölkkyittäin mitattuihin tilavuuksiin.

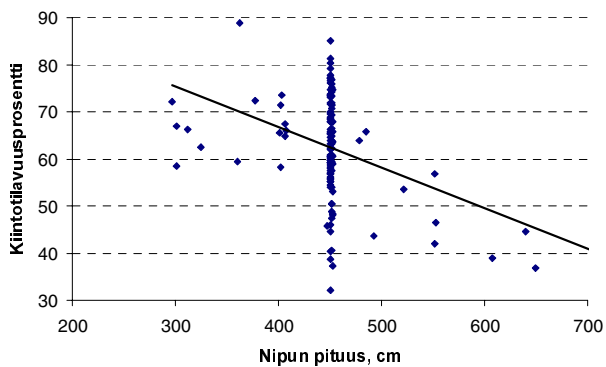
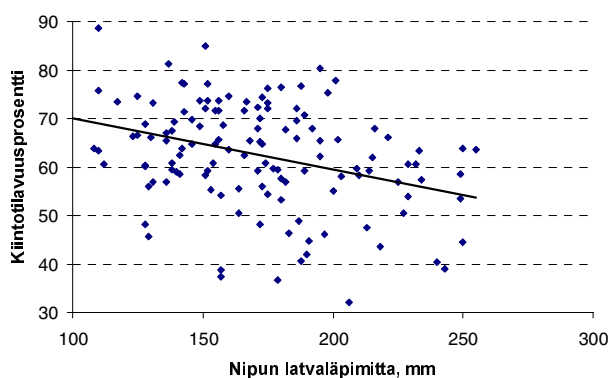
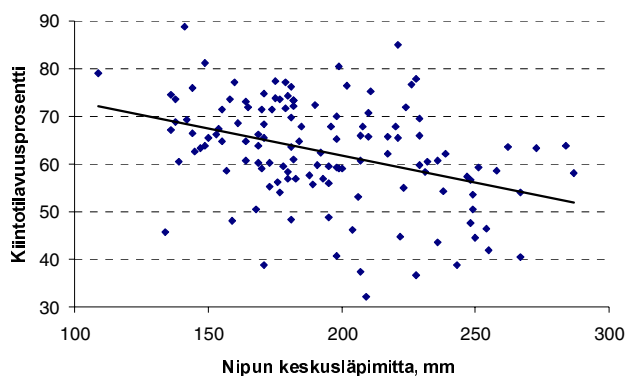
7.3 Tulokset ja johtopäätökset

7.3.1 Nippukohtaisten kiintotilavuusprosenttien määrittäminen

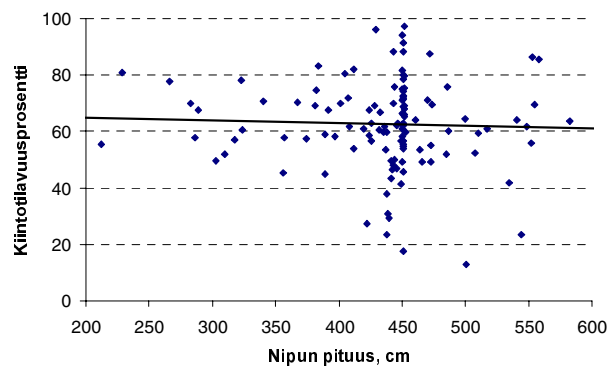
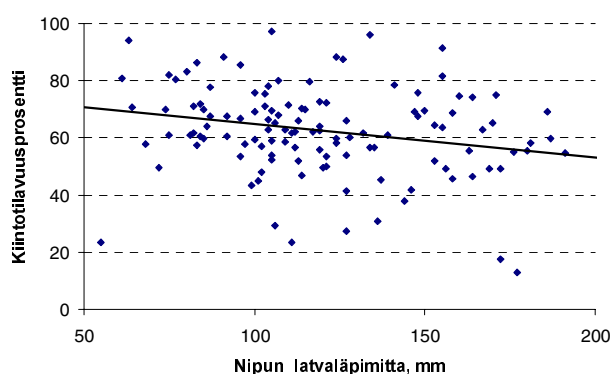
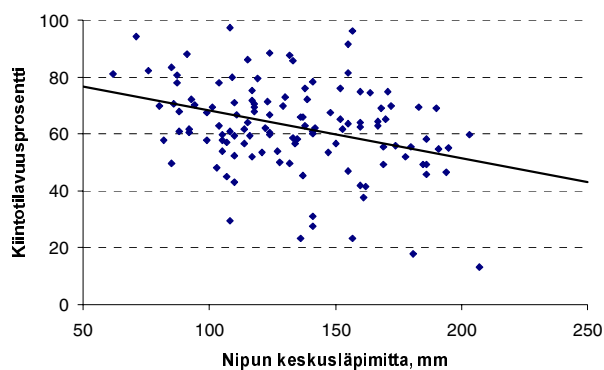
Kiintotilavuusprosentit laskettiin hakkuukoneen mittalaitteen havaitseman kehystilavuuden ja manuaalisesti kappaleittain mitatun todellisen kuorellisen tilavuuden perusteella. Kiintotilavuusprosentin keskiarvo oli sekä tyvinipuilla että muilla nipuilla 62. Kiintotilavuusprosentin keskihajonta oli tyvinipuilla 11 ja muilla nipuilla 16. Kuvan 37 hajontakaavioissa on esitetty koenippujen kiintotilavuusprosenttien havainnot hakkuukoneen stm-tiedostoista poimitujen nipun keskus- ja latvaläpimitan sekä pituuden mukaan. Hajontakaavioiden perusteella kiintotilavuusprosentti muuttuu hieman nipun keskus- ja latvaläpimitan mukaan. Kiintotilavuusprosentin suureen hajontaan nähden em. muuttujien selittävyttä voidaan kuitenkin pitää heikkona. Pituushavainnot ovat etenkin tyvipölkkyillä jakautuneet epätasaisesti, eikä kyseisen muuttujan selittävydestä voida tehdä päätelmiä.

Tyvinipuille ja muille nipuille laadittiin kiintotilavuusprosenttia selittävät regressiomallit. Selittäjänä käytettiin molemmissa malleissa hakkuukoneen stm-tiedostoista poimitua nipun keskusläpimittaa. Kullekin nipulle (kahden pölkyn niput) laskettiin todellinen kuorellinen tilavuus malleilla lasketuilla, nippukohtaisilla kiintotilavuusprosentteilla ja hakkuukoneen mittaamalla kehystilavuuksilla. Näin saadulle kiintotilavuudelle ja manuaalisesti pölkkyittäin mitatulle kiintotilavuudelle laskettiin nippukohtainen suhteellinen mittaero. Mittaeron jakauma tyvinipuilla ja muilla nipuilla on esitetty kuvassa 38. Koska malleja on testattu niiden laskenta-aineistoon, on selvää, että mittaeron keskiarvo on lähellä nollaa. Mittaeron keskihajonta oli tyvinipuilla 22 ja muilla nipuilla 28 ja koko aineistossa 25 prosenttiyksikköä.

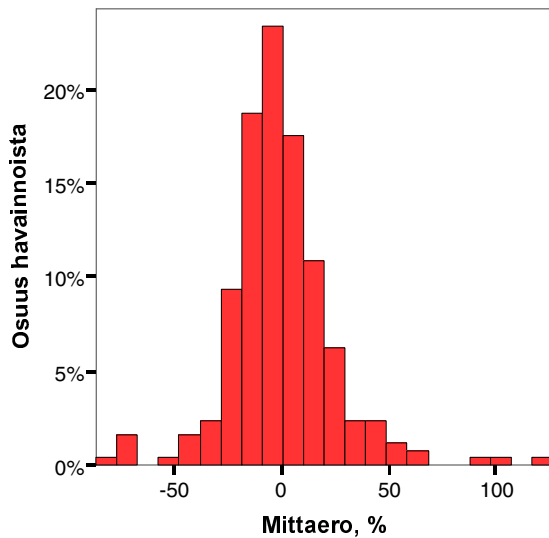
Tyviniput



Muut niput



Kuva 37. Hakkuukoneella mitatuista kehystilavuuksista ja manuaalisesti pölkyyttäin mitatuista kiintotilavuuksista lasketut kiintotilavuusprosentit nippujen pituuden ja keskus- ja latvaläpimitan mukaan tyvinipuilla (vas.) ja muilla nipuilla (oik.).



Kuva 38. Tutkitulla menetelmällä mitatun (malleilla lasketut kiintotilavuusprosentit ja hakukoneella mitattu kehystilavuus) ja todellisen (manuaalinen mittaus) tilavuuden suhteellisen nippukohtaisen mittaeron jakauma.

7.3.2 Eräkohtainen mittaustarkkuus

Puutavaran mittauksen tarkkuus muodostuu mittausmenetelmän tarkkuudesta ja mittauksen suoritustarkkuudesta. Suoritustarkkuuteen vaikuttavat mittaajasta, mittausvälineistä ja mittausolosuhteista aiheutuvat tekijät. Mittausmenetelmän menetelmätarkkuudelle on olennaista, että se tuottaa systemaattisesti harhattomia tuloksia, ts. mittaeron keskiarvo on lähellä nollaa.

Puutavaran mittauksen tarkkuus ilmaistaan mitatun ja todellisen tilavuuden suhteellisena (mitta)erona. Yleensä kiinnostus kohdentuu leimikon puutavaralajien mittaustuloksen oikeellisuuteen, ts. eräkohtaiseen mittaustarkkuuteen. Näin ollen puutavaraerän muodostavissa mittaussyksiköissä (pölkky, nippu, kuorma, pino) mittaeroja voi olla, kunhan mittaerojen keskiarvo on hyväksyttävän tarkkuuden puitteissa.

Tutkitussa mittausmenetelmässä puutavaraerä muodostui erikseen mitatuista, muutamien pölkkyjen muodostamista nipuista. Eräkohtaista tilastollista mittaustarkkuutta arvioitiin pölkkyriippujen tilavuuden keskiarvon ja suhteellisen mittaeron keskihajonnan perusteella. Eräkohtainen mittaustarkkuus laskettiin seuraavalla yhtälöllä.

$$E_{tot} = \frac{Ts\sqrt{v}}{\sqrt{V}}, \text{ missä}$$

E_{tot} = eräkohtainen mittaustarkkuus

T = t-jakauman kriittinen arvo halutulla riskitasolla

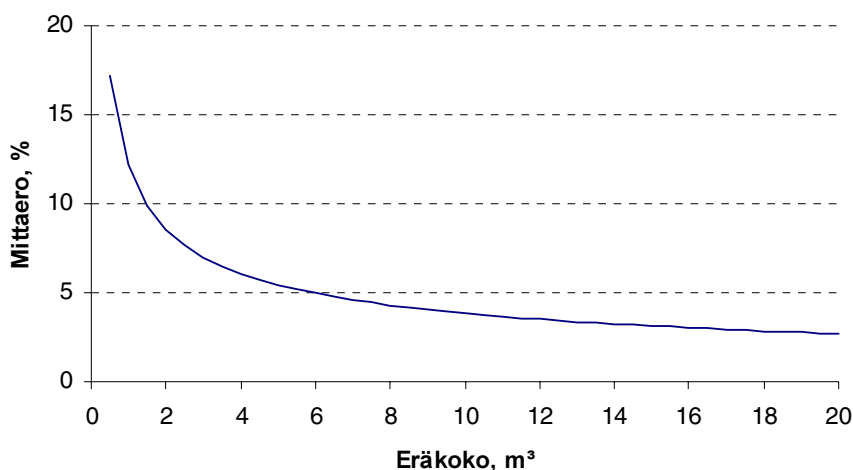
s = mittaeron keskihajonta mitattavien yksiköiden välillä

v = pölkkyriippun kiintotilavuuden keskiarvo

V = mittauserän koko

Yhtälöstä voidaan havaita, että eräkohtainen mittaustarkkuus paranee eräkoon kasvaessa ja toisaalta mitattavien yksiköiden (pölkkyneput) tilavuuden ja mittaeron keskihajonnan pienentyessä.

Kuvassa 39 on esitetty tutkitun mittaamenetelmän tarkkuus (95 %:n luottamusväli) eräkoon kasvaessa. Koska puutavaraerä koostui pienistä mittaussyksiköistä (pölkkyneput), saavutettiin hyvä tilastollinen mittaustarkkuus jo kohtalaisen pienillä, noin kymmenen kuutiometrin suuruisilla erillä. Pienten mittaussyksiköiden kyseessä ollessa huomattavan suuri mittaeron keskihajonta ei oleellisesti huonontanut eräkohtaista mittaustarkkuutta. Olennaista on kuitenkin huomata, ettei mittaamenetelmän harhattomuutta voitu todeta, sillä mallien laskennassa käytettiin samaa aineistoa.



Kuva 39. Tutkitun menetelmän eräkohtainen mittaustarkkuus (95 %:n luottamusväli) tutkimusaineistossa.

7.3.3 Mittausmenetelmän soveltamismahdollisuudet

Joukkokäsittelymenetelmällä korjatuille pölkkynepuille määritettiin kiintotilavuusprosentit hakkuukoneen mittalaitteen havaitseman kehystilavuuden ja manuaalisesti pölkkyittäin mitattujen kiintotilavuuksien perusteella. Kiintotilavuusprosenttien vaihteluväli ja keskihajonta olivat huomattavan suuria verrattuna pinomittauksessa havaittuihin vastaaviin tunnuslukuihin. Kärkkäisen (1979) mukaan kiintotilavuusprosentti vaihtelee yleensä välillä 55–75. Nikkilä ym. (1974) havaitsivat kiintotilavuusprosentin keskihajonnan vaihteluväliksi 2–11. Tässä tutkimuksessa tärkeimpänä virhelähteenä oli kehystilavuuden mittaaminen. Joukkokäsittelyssä runkojen karsintanopeus ei aina ollut sama, toisin sanoen saman nipun pölkkyt katkottiin eripituisiksi. Tällöin kehystilavuus joko yli- tai aliarvioitiin sen mukaan, minkä pölkyn pintaa pitkin pituusmittarulla kulki.

Tutkimusaineisto koostui ensiharvennumännikön hakkuun yhteydessä kerätyistä mäntykuitupuunipuista. Oletettavaa on, että puulaji vaikuttaa kiintotilavuusprosenttiin. Vastaavasti voidaan olettaa hakkuukoneen kouran ja mittausgeometrian vaikuttavan tässä tutkimuksessa toteutettuun kehystilavuuden mittaukseen ja edelleen kiintotilavuusprosenttiin. Mittausmenetelmän jatkokehitys edellyttäisi koehakkuiden toteuttamista erityyppisissä metsiköissä, eri puulajeilla ja mahdollisesti myös erilaisilla harvestereilla.

Tutkitun mittausmenetelmän käyttö edellyttää puutavaran karsimista ja katkontaa mittaustuloksen saamiseksi. Mittausmenetelmä ei näin ollen sovellu energiapuun mittaukseen silloin, kun energiapuuksi korjattavien runkojen latvoja ei karsita. Vastaavasti kuitupuun mittaus voidaan toteuttaa vahvistetuilla tehdasmittausmenetelmillä, joiden tarkkuus on erinomainen tutkittuun menetelmään nähden. Parhaimmillaan mittausmenetelmä voisi olla urakoitsijoiden apuväline tehdyn työmäärän arvioinnissa. Varsinaiseen työ- tai luovutusmittaukseen mittausmenetelmää ei voida soveltaa.

8 Johtopäätökset

Energiapuun korjuu karsittuna on yksi mahdollinen korjuuvaihtoehto. Erilliskorjuussa rangan korjuukustannukset olivat leimikkotason tarkastelussa $5,5 \text{ €/m}^3$ (noin 23 %) suuremmat kuin kokopuuna korjuun kustannukset. Kustannusero johtui hakkuun tuottavuuserosta, joka puolestaan aiheutui kertymän pienenemisestä. Korjuukustannusten ero pieneni puiden järeyden kasvaessa. Karsinta onkin järkevintä kohteissa, joissa korjattavien puiden läpimitta on luokkaa 9–13 cm ja rungon koko 30–70 dm³. Lehtipuuvaltaisissa kohteissa karsinta näytti alentavan tuottavuutta vähemmän kuin männiköissä. Tämä johtui pääosin siitä, että tiheissä lehtipuuvaltaisissa metsissä karsinta pudottaa kertymää vähemmän kuin männiköissä. Lisäksi lähes oksattomien runkojen karsinta on tehokasta ja usein oksattoman puutavaran hakkaamiseksi riittää vain latvatupsun katkaisu.

Rangan metsäkuljetus oli jonkin verran kokopuun kuljetusta tehokkaampaa ja kustannukset olivat rangalla 13 % pienemmät kuin kokopuulla. Ero johtuu suurelta osin kuormakoon kasvusta kuljetettaessa karsittua puuta. Rangan koneellista korjuuta on aiemmin tutkittu suhteellisen vähän, mutta nyt saadut tulokset ovat linjassa aikaisempiin kokopuukorjuuta käsitteleviin tutkimuksiin (esim. Kärhä 2004, Laitila ym. 2004, Ryyänen ym. 1998).

Energiapuiden karsinnan aiheuttama hakkuukertymän väheneminen kasvattaa hieman organisaatiokustannuksia ja koneiden siirtokustannuksia, sillä samalla työmäärällä saadaan hankittua vähemmän puuta. Rangan korjuulla on kuitenkin eräitä etuja kokopuun korjuuseen nähden. Rangan mukana kulkeutuu metsästä pois vähemmän ravinteita kuin kokopuun mukana. Hakkuutähteiden sisältämän typen määrän perusteella voidaan arvioida puuston kasvun eroja kokopuukorjuuna tai karsitun rangan korjuuna toteutetun energiapuuharvennuksen jälkeen. Lannoitustutkimusten (esim. Aarnio ym. 1997) perusteella voidaan arvioida, että tutkittujen korjuumenetelmien välinen 27 kilogramman hehtaarikohtainen ero typen määrässä voi johtaa

noin kolmen kuutiometrin eroon puuston kasvussa lyhyellä aikavälillä. Tämä kasvunlisäys kompensoi karsitun puun korkeampia korjuukustannuksia noin 1–1,5 €/lla rankakuutiometriä kohden, jos oletetaan kasvunlisäyksen olevan realisoitavissa jo 15 vuoden kuluttua seuraavassa hakkuussa. Kasvunlisäystä saattaa pienentää hakkuutähteiden epätasainen jakautuminen leimikolle. Tutkimustieto energiapuun talteenoton vaikutuksesta metsämaan ravinnetalouteen on edelleen varsin puutteellista ja esim. typpilaskeuman tai maaperän rapautumisen ravinnehävikkiä tasaavaa vaikutusta pitkällä aikavälillä on vaikea arvioida.

Markkinoilla on useita joukkokäsittelyyn kykeneviä ja syöttörullilla varustettuja hakkuulaitteimerkkejä. Näillä laitteilla on mahdollista tarvittaessa hakata aines- ja energiapuuta samasta leimikosta. Laitteet myös mahdollistavat hakkuukoneiden joustavan käytön varsinaisissa ainespuuhakkuissa ja energiapuuharvennuksissa ilman kahden erillisen hakkuulaitteen investointikustannuksia. Energiapuuta käsiteltäessä voidaan karsivilla hakkuulaitteilla jättää palstalle haluttu määrä hakkuutähteitä työn tuottavuuden säilyessä silti suhteellisen hyvänä. Nyt tutkittu täydellinen karsinta ei näyttäisi olevan perusteltua pelkästään latvusmassan korjaamisen aiheuttamien kasvutappioiden vähentämiseksi. Karsitun energiapuun käyttöarvon tulisi olla hieman kokopuuta korkeampi, jotta korkeammat korjuukustannukset tulisivat katetuiksi. Yksi mahdollinen vaihtoehto on korjata osapuuta siten, että osa elävästä latvuksesta jätetään palstalle. Tällainen toimintavaihtoehto olisi erityisen suositeltavaa korjattaessa energiapuuta talteen suometsistä.

Yhdistetyssä aines- ja energiapuun korjuussa alle ainespuukokoisten puiden hakkuun tuottavuus yksinpuinkäsittelyllä jää tämän ja aiempien tutkimusten (mm. Vesisenaho ym. 2002, Ryyänen ym. 1998) mukaan matalaksi, vaikka se tehtäisiinkin ainespuuhakkuun lisätyönä. Suuri ainespuumitat täyttämättömien puiden määrä kasvattaa korjuukertymää, mutta nostaa samalla nopeasti korjuun kokonaiskustannuksia, etenkin yksinpuinkäsittelyssä. Ainespuuksi kelpaamattomien puiden talteenotto energiapuuksi voi olla kannattavaa kohteissa, joissa on runsaasti järeää ja ainespuuksi kelpaamatonta puuta.

Ainespuiden latvojen koneellinen hakkuu ainespuuhakkuun lisätyönä ei lisää merkittävästi hakkuutyön ajanmenekkiä, koska latvoille kohdistuu ainoastaan latvuksen kasalle siirtoon, karsintaan ja katkaisuun kuluva aika. Integroidussa korjuussa alle ainespuumittaisten rungonosien keskikoko on kuitenkin hyvin pieni, jolloin hakkuukustannukset nousevat korkeiksi. Latvakappaleista kertyvän energiapuun hehtaarikertymä jää usein pieneksi, mikä nostaa metsäkuljetuksen kustannuksia. Lisäksi pienten energiapuuerien käsittely on korjuuketjun jatkovaiheissa logistisesti ongelmallista.

Teollisuuden ainespuulle käyttämät läpimitta- ja laatuvaatimukset vaikuttavat suuresti energiapuukertymään, etenkin integroidussa korjuussa. Nykyisin kuitupuun minimiläpimitta on yleisesti 6–8 cm. Näillä minimiläpimitoilla, nykyisellä kustannustasolla ja energiapuun raaka-ainearvolla karsitun energiapuuositteen talteenotto ei ole kannattavaa ainespuuleimikosta, etenkin jos aines- ja energiapuun hakkuu perustuu yksinpuin käsittelyyn.

Suomessa on aktiivikäytössä noin 1450 hakkuukonetta ja 1600 metsätraktoria. Kaluston työllisyydessä on kausivaihtelua, niin että talviaikaan koneet ovat täystyöllistettyjä, kun taas kelirikko- ja kesäaikaan konekapasiteettia on yli tarpeen. Koneyrittäjien liiton selvityksen mukaan (Jaakkola 2004) hakkuukoneet seisovat toimettomina keskimäärin 8 viikkoa vuodessa ja metsätraktorit 9 viikkoa vuodessa. Vuotuisia käyttötunteja koneille kertyi metsäkuljetuksessa keskimäärin 2112 h ja hakkuutyössä 2325 h. Vajaatyöllisyys syö koneyrittämisen kannattavuutta sekä heikentää työvoiman pysyvyyttä metsäalalla. Harvennuspuiden energiapuun korjuu ja hakkuulaitteisiin asennettavat lisälaitteet ovat eräs keino tasoittaa metsäkoneiden työllisyyden kausivaihtelua. Investointina hakkuulaitteen energiapuuvarustus on suhteellisen pieni ja energiapuun otollisin hakkuuaika osuu juuri niille kevään ja kesän viikoille, jolloin pääosa ainespuun korjuussa käytetyistä koneista on vajaatyöllistettyjä.

Rankana korjuu on eräs keino virtaviivaistaa pienpuun hankintaa. Karsitun ja määrämittaan katkotun energiapuun kaukokuljetuksessa voidaan käyttää, toisin kuin kokopuun kuljetuksessa, vakiorakenteisia tai laidoilla varustettuja puutavara-autoja, joilla ranka kuljetetaan käyttöpaikalle tai terminaalille hakettavaksi. Pienelle tai keskikokoiselle voimalaitokselle toimitettu rankapuu on mahdollista haketta siirrettävällä hakkurilla joko voimalaitoksen varastosiiloon tai varastoamaan voimalaitoksen pihalle. Suurilla käyttöpaikoilla rankapuu on mahdollista purkaa suoraan käyttöpaikkamurskaimen kuljettimelle. Karsitun energiapuun kaukokuljetus ei ole kovin yleistä, mutta onnistuessaan se tarjoaa mielenkiintoisia logistisia mahdollisuuksia. 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.

Alueellisessa tarkastelussa rankana korjuu nosti korjuukustannuksia 17–25 % ja pienensi kertymää kokopuuna korjuuseen verrattuna 42–46 %. Rankana korjuulla on kuitenkin saavutettavissa merkittäviä kustannussäästöjä, mikäli energiapuun karsinnan avulla korjuu voidaan ulottaa niille kohteille, joilta kokopuuna korjuuta on pyritty mahdollisten kasvuhäiriöiden ja -tappioiden vuoksi välttämään. Tällaisia alueita ovat mm. Pohjanmaa ja Pohjois-Suomi, missä turvemaiden osuus reheviin kivennäismaihin verrattuna on huomattavan suuri.

Viime vuosina voimakkaasti lisääntynyt energiapuun hankinta on tuonut esille tarpeen energiapuun mittausmenetelmien kehittämiseksi. Toisin kuin ainespuulla, energiapuun työ- ja luovutusmittaukselle ei ole olemassa vahvistettuja mittausmenetelmiä. Tällä hetkellä energiapuun mittauksessa käytetään hajanaisia ja sopimuskohtaisia menetelmiä. Tähän liittyen Metsäntutkimuslaitoksessa on käynnistetty tutkimushanke, jonka keskeisenä tavoitteena on tuottaa tietoa energiapuun mittauksen ohjeistamista varten. Hankkeessa kootaan olemassa oleva soveltuva tieto mm. ranka- ja kokopuun pinomittauksesta. Lisäksi hankkeessa tutkitaan energiapuun mittauksen puutieteellisiä perusteita (ml. muuntoluvut) ajatellen painomittauksen kehitystyötä.

Kirjallisuus

- Aarnio, J., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1997. Lannoitus. Julkaisussa: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (toim.) Kannattava puuntuotanto. Metsälehti kustannus. s. 109–125.
- Asikainen A., Ranta T., Laitila J. & Hämäläinen J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suuri-mittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Bergkvist, I. 2003. Flerträdshantering höjer prestationen och ökar nettot i klen gallring. Skogforsk resultat 5.
- Hakkila, P. 1978. Pienpuun korjuu polttoaineeksi. Folia Forestalia 342. 38 s.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. 24 s.
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. 135 s.
- Hujo, S. 2004. Puutavaran mittausten menetelmien osuudet 2003. [www-dokumentti] Saatavissa: www.metsateho.fi.
- Jaakkola, S. 2004. Koneyrittäjien suhdanteet 2004–2005: Työtä riittää, tuloksentekeyky hiipuu. Koneyrittäjä 8: 13–15.
- Korhonen, K.T., Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A. & Tonteri, T. 2000a. Lounais-Suomen metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1964–98. Metsätieteen aikakauskirja 2B: 337–441.
- Korhonen, K.T., Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A. & Tonteri, T. 2000b. Hämeen – Uudenmaan metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1965–99. Metsätieteen aikakauskirja 3B: 489–566.
- Korhonen, K.T., Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A., Tonteri, T. & Tuomainen T. 2000c. Pirkanmaan metsäkeskuksen alueen metsävarat 1965–99. Metsätieteen aikakauskirja 4B: 661–739.
- Korhonen, K.T., Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A., Tonteri, T. & Tuomainen T. 2001. Pohjois-Karjalan metsäkeskuksen alueen metsävarat 1966–2000. Metsätieteen aikakauskirja 3B: 495–576.
- Kuitto, P.-J., Keskinen S., Lindroos J., Oijala T., Rajamäki J., Räsänen T. & Terävä J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. 38 s.
- Kärhä, K. 2004. Keto Forst Energy ja Valmet 945 saksin hakkuulaitteet energiapuun hakkuussa. Metsätehon katsaus 1. 4 s.
- Kärkkäinen, M. 1979. Kuitupuun kiintomittaus kourakasoissa. Summary: Measurement of solid volume of pulpwood grapple heaps. Folia Forestalia 410: 1–15.
- Kärkkäinen, M. 1982. Pölkyittäinen kuitupuun mittaaminen. Summary: Measurement of pulpwood by the bolt. Folia Forestalia 501: 1–47.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 p.
- Laasasenaho, J. 1999. Metsän mittaaminen ja kartoitus. Marvi-luentomoniste. Helsingin yliopisto. Metsävarojen käytön laitos. 152 s.
- Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K. T. & Nuutinen, Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. 57 s.
- Lehtoranta, T. Terminaalihakkeen toimitusketjut. Metsäteknologian ja puutalouden Pro gradu. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 75 s. + liitt. 11 s.
- METINFO. 2004. [www-dokumentti] Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/index.htm#metsavarat>.
- Nikkilä, H., Rikkinen, P. & Heiskanen, V. 1974. Suomalaisen kuitupuun pinotiheys ja siihen vaikuttavan tekijät. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 82.1: 96 s.
- Nousiainen, I., Imponen, V., Jaatinen, E. & Korpilahti, A. 1995. Puupolttaineiden tuotantomenetelmät. Nykytekniikka, kustannukset ja kehittämismahdollisuudet. Bioenergian tutkimusohjelma, Julkaisuja 5. 97 s.
- Pasanen, K. 2004. RUTILA, Excel pohjainen rungon tilavuuden laskentaohjelma.
- Ranta, T., Asikainen, A., Lehikoinen, M., Väätäinen, K., Halonen, P. & Frilander, P. 2002. Metsähakkeen autokuljetuksen logistiikka. Tutkimusraportti PRO/T6042/02, VTT Prosessit. 31 s. + liitt. 4 s.
- Ryynänen, S., Ihonen, M. & Nätt, H. 1988. Metsänomistajan energiapuun korjuutekniikat. Bioenergian tutkimusohjelman tutkimusprojektien 130 ja 135 loppuraportti. Työtehoseuran julkaisuja 363. 56 s.

- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 s.
- Seppänen, A. & Kärhä, K. 2003. Pilkekauppa Suomessa. Työtehoseuran metsätiedote 4. 6 s.
- Solmio, H. 2002. Hakelämmityksen nykytila maataloilla. Työtehoseuran metsätiedote 9. 4 s.
- Sevola, Y., Peltola, A. & Moilanen, J. 2003. Polttopuun käyttö pientaloissa 2000/2001. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 894.
- Toivonen, M. 1998. Hakkuutähteiden terminaalihaketuksen simulointi. Metsäteknologian ja puutalouden pro gradu. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 33 s.
- Tomppo, E., Henttonen, H., Korhonen, K.T., Aarnio, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Ihalainen, A., Mikkilä, H., Tonteri, T. & Tuomainen, T. 1998a. Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1968–97. Metsätieteen aikakauskirja 2B: 293–374.
- Tomppo, E., Katila, M., Moilanen, J., Mäkelä, H. & Peräsaari J. 1998b. Kunnittaiset metsävaratiedot 1990–94. Metsätieteen aikakauskirja 4B: 619–839.
- Tomppo, E., Henttonen, H., Korhonen, K.T., Aarnio, A., Ahola, A., Ihalainen, A., Heikkinen, J. & Tuomainen, T., 1999a. Keski-Suomen metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1967–96. Metsätieteen aikakauskirja 2B: 309–387.
- Tomppo, E., Henttonen, H., Korhonen, K.T., Aarnio, A., Ahola, A., Heikkinen, J. & Tuomainen, T., 1999b. Pohjois-Savon metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1967–96. Metsätieteen aikakauskirja 2B: 389–462.
- Tomppo, E., Korhonen, K.T., Henttonen, H., Ihalainen, A., Tonteri, T. & Heikkinen, J. 1999c. Kymen metsäkeskuksen alueen metsävarat ja niiden kehitys 1966–98. Metsätieteen aikakauskirja 3B: 603–681.
- Tomppo, E., Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Tonteri, T., Heikkinen, J. & Henttonen, H. 2000. Skogstillgångarna inom Kustens skogscentral och deras utveckling 1965–98. Metsätieteen aikakauskirja 1B: 83–232.
- Tomppo, E., Henttonen, H. & Tuomainen, T. 2001a. Valtakunnan metsien inventoinnin menetelmä ja tulokset metsäkeskuksittain Pohjois-Suomessa 1992–94 sekä tulokset Etelä-Suomessa 1986–92 ja koko maassa 1986–94. Metsätieteen aikakauskirja 1B: 99–248.
- Tomppo, E., Henttonen, H., Ihalainen, A., Tonteri, T. & Tuomainen, T. 2001b. Etelä-Savon metsäkeskuksen alueen metsävarat 1966–2000. Metsätieteen aikakauskirja 2B: 309–388.
- Tomppo, E., Tuomainen, T., Henttonen, H., Ihalainen, A. & Tonteri, T. 2003. Kainuun metsäkeskuksen alueen metsävarat 1969–2001. Metsätieteen aikakauskirja 2b: 169–256.
- Uusiutuvan energian edistämishjelma 2003–2006. 2003. Työryhmän ehdotus. Kauppa- ja teollisuusministeriön työryhmä- ja toimikuntaraportteja 5/2003. Energiaosasto. 56 s.
- Verkasalo, E. 1987. Rumpuhakkuri TT 97 R. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 282. 45 s.
- Vesisenaho, T., Niemi, M., Wickstrand, H. & Vääräsmäki, M. 2002. Latvahukkapuun hyödyntäminen energiapuuksi koneelliseen puunkorjuuseen integroituna männiköiden ensiharvennuksella. Hanke- raportti. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. 28 s.
- Ylitalo, E. 2004. Puun käyttö - Wood consumption. Julkaisussa: Peltola, A. (toim.) Metsätilastollinen vuosikirja 2004. Skogsstatistisk årsbok 2004. Finnish Statistical Yearbook of Forestry 2004. Metsäntutkimuslaitos. Suomen virallinen tilasto, Maa-, metsä- ja kalatalous 2004:45. s. 247–273.
- Ylitalo, E. 2005. Kiinteiden puupolttoaineiden käyttö 2004. Seminaariesitelmä. Finbion kevätpäivä 2005.
- Äijälä, O., Fredriksson, T., Kuusinen, M. & Poikela, A. 2004. Koneellisen energiapuun korjuun laadunseurannan kehittämisprojektin (KELK) loppuraportti. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 40 s.