

Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka

Juha Laitila, Antti Asikainen, Lauri Sikanen, Kari T. Korhonen
ja Yrjö Nuutinen



PUUENERGIA

METLA www.metla.fi

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

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan 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 Laitila, Juha, Asikainen, Antti, Sikanen, Lauri, Korhonen, Kari T. & Nuutinen, Yrjö			
Nimeke Pienpuuhakkeen kustannustekijät ja toimituslogistiikka			
Vuosi 2004	Sivumäärä 57 + liites.	ISBN 951-40-1932-6	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuun tutkimuskeskus / (Kansallinen Puuenergian Teknologiahjelma) / 7095 Metsähakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka			
Hyväksynyt Jari Parviainen, tutkimuskeskuksen johtaja, 2.8.2004			
Tiivistelmä <p>Hankkeessa kehitettiin VMI:n koeala- ja monilähdeinventointiaineistoon sekä metsäyhtiöiden leimikkotietoihin perustuva nuorten metsien energiapuun kertymä- ja korjuukustannusten laskentamenetelmä. Kertymä-laskelmissa hankinta-alueen säde oli 100 km tieverkkoa pitkin ja hankinta-alueet sijaitsivat Joensuun, Kouvolan, Valkeakosken Vaasan, Jyväskylän, Rovaniemen ja Kajaanin ympäristössä. Pienpuun saatavuudelle määritettiin viisi eri tasoa ekologis-taloudellisilla rajoitteilla.</p> <p>Laskenta-alueista Kouvolan ympäristössä pienpuun kertymä oli suurin ja Vaasan ympäristössä pienin. Vaasan ympäristössä kertymä 100 kilometrin säteellä oli eri kertymärajoitteilla 50 000–210 000 m³ vuodessa ja Kouvolan alueella 230 000–790 000 m³ vuodessa. Joensuun, Jyväskylän ja Kajaanin ympäristössä kertymät olivat 120 000–500 000 m³ vuodessa. Kertymä-laskelmissa käytetyt rajoitteet vaikuttivat energiapuukertymän ohella puulajisuhteisiin. Kasvupaikan viljavuudelle asetetut minimirajoitteet vähensivät männyn osuutta ja lisäsivät koivun ja muiden lehtipuiden osuutta kokonaiskertymästä. Erot miestyönä tai koneella tehdyn pienpuun kaato-kasauksen kustannusten välillä ovat pienet, mutta kun huomioidaan metsäkuljetuksen tehostuminen koneellisen kaadon jäljiltä, on koneellinen korjuu miestyötä edullisempaa.</p> <p>Käyttöpaikkahintoja tarkasteltaessa ero kalleimman ja halvimman alueen välillä oli 15 %. Valkeakoskella ja Kouvola oli halvimmat käyttöpaikkahinnat. Seuraavaksi edullisimmat alueet olivat Jyväskylä, Joensuu ja Kajaani. Rovaniemellä oli korkein käyttöpaikkahinta ja Vaasassa toiseksi korkein. Koneelliseen kaato-kasaukseen ja kokopuun käyttöpaikkahakkeeseen perustuva korjuuketju oli menetelmävertailussa edullisin kokopuuhakkeen tuotantomenetelmä. Pienpuulle maksettavat ns. Kemera-tuet parantavat pienpuuhakkeen kilpailukykyä hakkuutähdehakkeeseen verrattuna. Ilman tukia pienpuu ei pärjää hintavertailussa hakkuutähdehakkeen kanssa. Pienpuuhakkeen ero hakkuutähdehakkeen kustannuksiin syntyy kaato-kasausvaiheessa, joka maksaa 12–15 €/m³. Siksi toiminnan tehostaminen tulisi kohdistua juuri tähän vaiheeseen. Muiden kustannustekijöiden osalta pienpuuhake on kilpailukykyistä hakkuutähdehakkeeseen verrattuna.</p>			
Asiasanat energiapuun, nuoret metsät, puunkorjuu			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Juha Laitila, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu. Sähköposti juha.laitila@metla.fi			
Muita tietoja Raportin taitto: Maija Heino			

Sisällys

1 Johdanto	5
1.1 Tutkimuksen tavoitteet	6
2 Pienpuun kertymät ja muut olosuhdetekijät	7
2.1 Pienpuun kertymien laskentaperusteet	7
2.2 Pienpuun kertymät ja rungon keskikoko	9
2.3 Metsäkuljetusmatka ja työmaan koko	15
3 Pienpuun korjuuketjujen tuottavuudet	17
3.1 Timberjack 720 keräävän energiapuukouran aikatutkimukset	17
3.1.1 Työpistesiiro	19
3.1.2 Pienpuun prosessointi	19
3.1.3 Tulosten tarkastelu	20
3.2 Osapuu- ja kokopuumenetelmän vaikutus Timberjack 720:n tuottavuuteen	21
3.3 Pienpuun metsäkuljetuksen aikatutkimukset	22
3.3.1 Tyhjänäajo	24
3.3.2 Pienpuun kuormaus	24
3.3.3 Kuormausajo	28
3.3.4 Kuormattuna-ajo	29
3.3.5 Kuorman purku	30
3.3.6 Tulosten tarkastelu	30
3.4 Energiapuukorjurin aikatutkimukset	33
3.5 Pienpuun paalaus välivarastolla	35
4 Korjuuketjujen kustannusrakenne	37
5 Toimintaolosuhteiden vaikutus korjuukustannuksiin	41
5.1 Korjuukustannusten laskentaperusteet	41
5.2 Kertymärajoitteiden vaikutus käyttöpaikkahintaan	41
5.3 Erot käyttöpaikkahinnoissa maan eri osissa	44
5.4 Pienpuuhakkeen toimitusketjujen vertailu	47
6 Pienpuuhakkeen tukien ja hakkuutähdevirtojen integroinnin vaikutus käyttöpaikkahintaan	49
7 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	52
Kirjallisuus	55
Liite 1.	58

1 Johdanto

Pienpuun korjuuketjujen tuottavuuksista ja kustannuksista ei ole yhtenäistä esitystä. Uutta pienpuun koneelliseen korjuuseen perustuvaa teknologiaa on otettu käyttöön ja vakiintuneiden menetelmien osalta kehitys on mennyt eteenpäin. Lisäksi hakkuutähdehakkeen korjuumäärien kasvu mahdollistaa pienpuun energiakäytön tehostamisen toimitusketjujen integroinnin ja korjuukohteiden yhteissuunnittelun avulla (Sirén 2002). Pienpuu on nuorten metsien harvennuksilta kertyvää kokopuuta, joka ei mitta- ja laatuvaatimuksien vuoksi sovellu teollisuuden ainepuuksi. Pienpuu on merkittävä ja suuressa mittakaavassa lähes hyödyntämätön energiapuuvaraus, josta korjuuteknologiaa kehittämällä voi tulla merkittävä energiatuotannon lähde. Vuonna 2003 metsistä korjattua polttohaketta käytettiin 2,1 miljoonaa kiintokuutiometriä ja harvennuksilta korjattavan pienpuun osuus määrästä oli noin viidennes (Ylitalo 2004). Lisäksi kotitalouksissa käytetään pienpuusta valmistettua pilkettä noin 5,5 miljoonaa kiintokuutiometriä.

Metsähakkeen käyttömäärien ripeän kasvun taustalla on pääasiassa ollut päätehakuilta korjattava hakkuutähde ja kannot. Muiden raaka-ainelähteiden osalta kasvu ei ole ollut yhtä nopeaa. Pienpuuhakkeen kompastuskivenä on ollut sen hakkuutähdehaketta noin 50 % korkeampi tuotantokustannus, joka aiheutuu lähinnä pienpuun kalliista kaadosta ja kasauksesta. Hakkuutähdehakkoon kohdalla tätä kustannusta ei juuri ole, koska hakkuutähdehakkoon voidaan hakkuukoneen työtapa muuttamalla integroida ainespuun korjuuseen. Muissa työvaiheissa kustannuserot hakkuutähdehakkeen ja pienpuuhakkeen välillä ovat vähäiset.

Energiapuu käyttömäärien kasvaessa korjuu joudutaan ulottamaan entistä suuremmalle maantieteelliselle alueelle. Lisäksi aikaisempaa epäedullisemmat kohteet on otettava korjuun piiriin, jotta käyttöpaikkojen polttoaineen tarve saadaan täytettyä. Pienpuuhakkeen kilpailukykyä parantaa sille maksettava tuotantotuki, jonka suuruus on noin 11 €/m³ (www.metsavastaa.fi 2004). Tuet huomioiden lähellä käyttöpaikkaa sijaitseva pienpuuleimikko on usein edullisempi korjuukohteeksi kuin kaukana sijaitseva ja hankalasti korjattava hakkuutähdeleimikko.

Pienpuuhakkeen tuotanto nähdään hyödylliseksi siksi, että se tukee nuorten harvennuskasvatusten hoitoa (Hakkila ja Fredrikson 1996, Hakkila 2004). Pienpuuhakkeen kosteus ja myös muut laatuominaisuudet, kuten palakoko, ovat helpommin hallittavissa kuin hakkuutähdehakkoon. Kokopuun hyödyntäminen laajentaa ja monipuolistaa metsäpolttoaineiden tuotantopohjaa ja parantaa siten huoltovarmuutta. Pienpuun korjuumäärät eivät riipu metsäteollisuuden suhdanteista, toisin kuin hakkuutähdehakkoon ja kantopuulla. Matalasuhdanteessa teollisuuden ainespuun hakkuut supistuvat, mikä vaikuttaa välittömästi myös päätehakuilta korjattavan hakkuutähdehakkoon ja kantopuun korjuumääriin. Matalasuhdanne pienentää myös metsäteollisuuden tuotantolaitoksilta kertyvien ja energian tuotantoon käytettävien sivutuotteiden, kuoren ja sahapurun, määrää.

Pienpuuhakkeen korjuukustannuksiin ja käyttöpaikkahintaan vaikuttavat mm. vuosittain korjattavissa oleva puumäärä, koneiden työllistyminen, rungon tilavuus, puulaji, metsäkuljetusmatka, työmaan koko, kaukokuljetusmatka sekä toiminnan organisointi. Korjuuolosuhteet maan eri osis-

sa vaihtelevat voimakkaasti korjattavissa olevan pienpuumäärän, kasvupaikkatekijöiden, puulajisuhteiden, työmaan koon sekä tiestön, vesistöjen ja peltojen tiheyden mukaan.

Hakkuutähdehakkeen saatavuutta ja kustannustekijöitä selvittäneissä tutkimuksissa (Asikainen ym. 2001, Ranta 2002) havaittiin, että eri korjuumenetelmien kilpailukyky vaihtelee toiminnan mittakaavan ja olosuhdetekijöiden mukaan. Hankinnan mittakaavan vaikutukset korjuukustannuksiin voivat olla sekä positiivisia että negatiivisia. Hankintamäärän kasvaessa kaukokuljetusmatkat kasvavat ja kustannukset nousevat, kun korjuu on ulotettava aiempaa laajemmalle alueelle. Lisäksi korjuuolosuhteiltaan ja kertymiltään aikaisempaa epäedullisemmat leimikot on otettava korjuun piiriin, jotta polttoaineen tarve saadaan tyydytettyä. Toisaalta hankinnan mittakaavan kasvattaminen mahdollistaa korjuuketjujen entistä paremman työllistymisen ja aiempaa tehokkaampien ja pääomavaltaisempien menetelmien käyttöönoton. Lisäksi erityyppisten kuljetus- ja varastohallinnan optimointimenetelmien käyttö tulee mahdolliseksi, kun ohjattavia kalustoyksiköitä on riittävä määrä.

Yksittäisen käyttöpaikan hakkuutähdehakkeen käytön volyyymi määrää hankinta-alueen koon ja näin ollen edullisimman korjuumenetelmän. Korjuuketjujen valintaan tehtävät tarkastelut on räätälöitävä käyttöpaikkakohtaisesti ja yleistarkastelut voivat johtaa vääriin johtopäätöksiin. Etelä- ja Keski-Suomessa, jossa on runsaat metsävarat, hakkuutähde kertyy runsaasti jo pieneltä hankintasäteeltä. Pohjanlahden rannikolla, jossa hankinta-alue on puoliympyrän muotoinen ja hakkuutähdekertymä on pieni, voimallisuuden tarvitsema hakkuutähdehakemäärä on korjattava huomattavasti suuremmalta hankintasäteeltä, kuin jos käyttöpaikka olisi Etelä- tai Keski-Suomessa. Korjuuketjulla, jolla hakkuutähde kuljetetaan tiivistämättömänä käyttöpaikalle hakettavaksi, korjuukustannukset nousevat hankintasäteen kasvaessa nopeasti, koska irtonaisten hakkuutähdeiden kaukokuljetuksen kuormakoko jää pieneksi. Välivarastohaketus ja hakkuutähdeiden tiivistäminen risutukeiksi kasvattavat kuormakokoa ja kuljetuskapasiteettia, eivätkä niihin perustuvat menetelmät reagoi yhtä voimakkaasti kaukokuljetusmatkan kasvuun. Tästä syystä risutukkeihin perustuva korjuuketju on irtorisua kannattavampi menetelmä Pohjanmaalla jo huomattavasti pienemmällä hankintamäärällä kuin alueilla, joissa hankinta-alue on ympyränmuotoinen ja hakkuutähde kertyy runsaasti lyhyidenkin kaukokuljetusmatkojen takaa (Laitila 2000).

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää pienpuuhakkeen kustannusrakenne ja toiminnan mittakaavan vaikutus tuotantokustannuksiin maan eri osissa. Lisäksi selvitettiin korjuukohteiden valintakriteerien sekä pienpuuhakkeen ja hakkuutähdehakkeen raaka-ainevirtojen integroinnin kustannusvaikutukset. Toimitusketjujen pullonkaulat pyrittiin tunnistamaan ja kustannusrakenneselvityksen kautta tunnistettiin ne hankintaketjujen kohdat, joissa on kehityspotentiaalia.

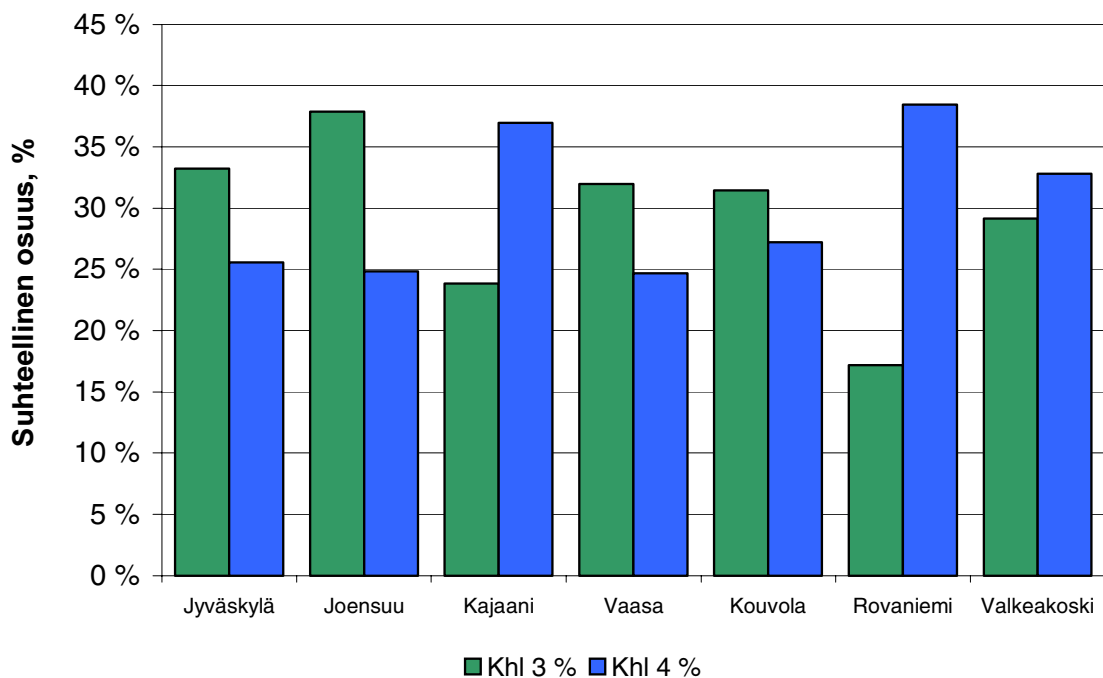
Pienpuun kertymät ja korjuukustannukset laskettiin Jyväskylässä, Joensuussa, Kouvolassa, Valkeakoskella, Kajaanissa, Vaasassa ja Rovaniemellä sijaitseville käyttöpaikoille, joiden hankinta-alueen säde on 100 kilometriä tieverkkoa pitkin.

2 Pienpuun kertymät ja muut olosuhdetekijät

2.1 Pienpuun kertymien laskentaperusteet

Pienpuun 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 koealatieloihin sekä monilähdeinvennoinnin (www.metinfo.fi, 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. Kuvassa 1 on esitetty varttuneiden taimikoiden (kehitysluokka 3 (khl 3) VMI:n luokittelun mukaan) ja nuorten kasvatusmetsien (khl 4) suhteelliset osuudet metsämaan pinta-alasta eri kaupunkien ympäristössä.

Kertymätarkastelussa oli mukana runkopuun lisäksi puiden elävä latvusmassa. Latvusten tilavuus laskettiin latvusmassayhtälöiden (Hakkila 1991) ja kuivatuoretiheys (Hakkila 1978) kertomien avulla. Kertymään laskettiin mukaan kaikki ne harvennuspoistuman puut, myös ainespuun mitat täyttävät puut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli yli 4 cm. Kertymätarkastelussa talteen-saanto oli 100 %. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 4 cm puut eivät olleet mukana kertymätarkastelussa. Varsinaiseksi energiapuuksi laskettiin ne rungot, joiden rinnankorkeusläpimitta oli 4–9 cm. Sitä järeämmät rungot luokiteltiin ainespuuksi. Lopullisissa tuloksissa kertymää ei jaoteltu



Kuva 1. Kehitysluokkien osuudet metsämaan pinta-alasta laskenta-alueittain.

erikseen aines- ja energiapuuhun, vaan kaikki harvennuspoistuman puut oletettiin korjattavan kokopuuna energiakäyttöön. Ainespuun minimilatvaläpimitta oli 6 cm kuoren päältä ja rungosta piti saada vähintään 2 metrin mittainen pölkky. Lisäksi pölkyn piti täyttää puunostajien yleisesti soveltamat laatuvaatimukset (www.metinfo.fi/laatuseloste 2004). Harvennusvoimakkuus määritettiin laskennallisesti Tapion harvennusmallien alarajalle.

Laskentakuvion eli VMI-koealan edustama pinta-ala laskenta-alueen kunnissa laskettiin metsäkeskuksittain seuraavalla kaavalla:

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

$N_{khl,y}$ = 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} = Ensiharvennus- tai taimikonhoitotarpeessa olevien koealojen lukumäärä metsäkeskuksessa.

Esimerkiksi Liperissä nuorten kasvatusmetsien (khl 4) pinta-ala on 184 km² ja Metsäkeskus Pohjois-Karjalan alueella khl 4:n pinta-alasta 37 %:lla on taimikonhoidon tai ensiharvennuksen tarve lähimmällä 5-vuotiskaudella. Liperissä ensiharvennus- tai taimikonhoitotarpeessa olevan nuorten kasvatusmetsien koealojen/laskentakuvioden edustama pinta-ala on 184 km² X 37 % = 68 km². Pohjois-Karjalan alueella on 707 nuoren kasvatusmetsän koealaa, joilla on taimikonhoidon tai ensiharvennuksen tarve ensimmäisellä 5-vuotiskaudella. Näin ollen Liperissä yhden ensiharvennus- tai taimikonhoitotarpeessa olevan nuorten kasvatusmetsien koelan eli laskentakuvion edustama pinta-ala on 68 km² / 707 = 0,096 km².

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) sekä aines- ja kokopuukertymä (m³/ha) puulajeittain. Kertymät oli estimoitu simuloimalla koealan puustolle alaharvennus, jossa koealalta mitattuja puita poistettiin suuruusjärjestyksessä pienimmästä puusta lähtien kunnes harvennusmallien alaraja saavutettiin. Pienpuun koealakohtainen kertymätieto muutettiin laskentakuvion kertymäksi, kun koealan kertymätieto (m³/ha) kerrottiin laskentakuvion pinta-alalla (ha).

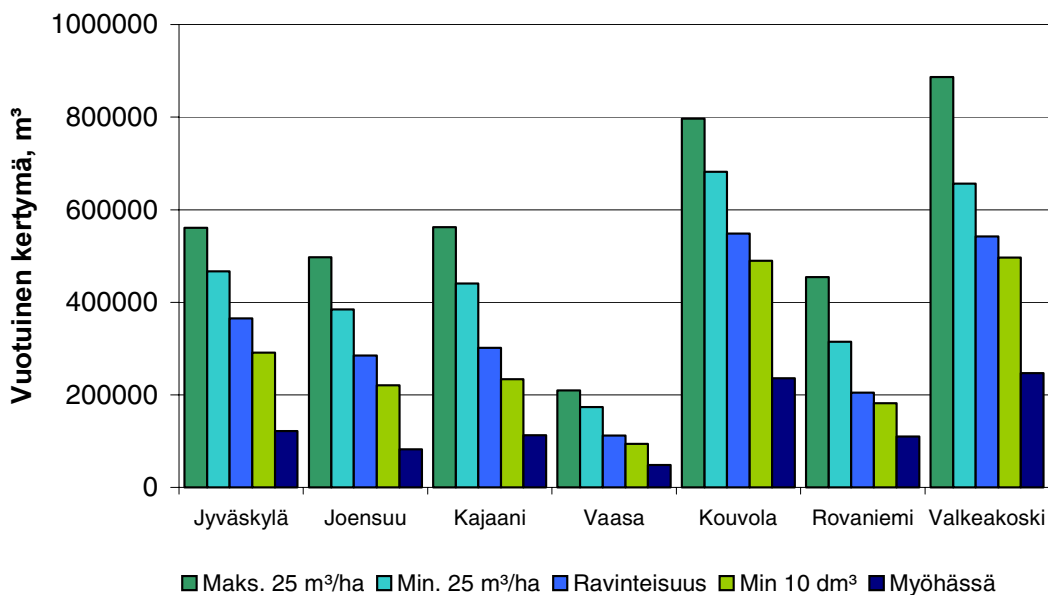
Kertymätarkasteluissa pienpuun saatavuudelle nuorista kasvatusmetsistä määritettiin koealatietojen perusteella viisi kumulatiivista tasoa ja rajoitetta:

1. Ainespuun hehtaarikohtainen kertymä sai olla enintään 25 m³/ha.
2. Energiapuun hehtaarikohtainen kertymä piti olla vähintään 25 m³/ha.
3. Ravinnerajoite. Turvemaat (rämeet ja korvet) ja mustikkatyyppiä karummat kasvupaikat eivät olleet mukana kertymätarkastelussa.
4. Rungon keskikoko. Laskentakuviolla rungon keskikoko piti olla vähintään 10 dm³.
5. Hakkuun kiireellisyys. Edellä mainittujen rajoitteiden lisäksi laskentakuviolla oli taimikonhoito tai ensiharvennus myöhässä eli ns. ”rästikohteet”.

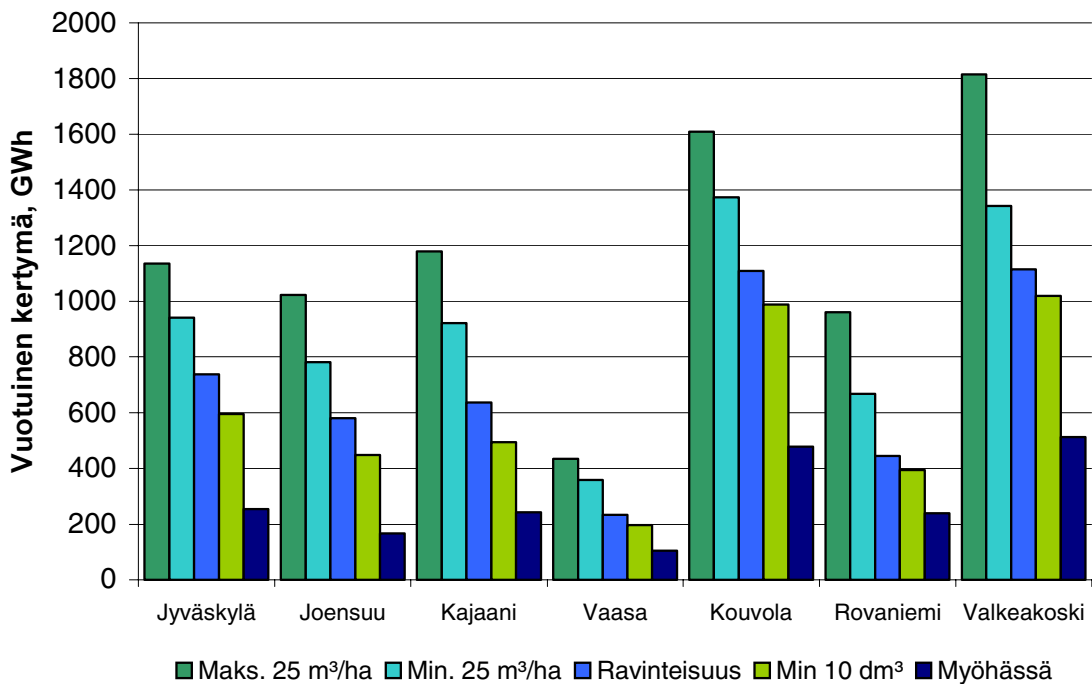
2.2 Pienpuun kertymät ja rungon keskikoko

Hankinta-alueiden koko ja pienpuun saatavuus vaihtelivat maan eri osissa. Hankinta-alueiden kokoon vaikutti paikkakunnan sijoittuminen suhteessa valtakunnan rajoihin ja rannikkoon sekä tieverkon geometria. Otollisimpia kohteita olivat Etelä-Suomen paikkakunnat, joissa ei ollut hankinta-aluetta rajoittavia maantieteellisiä esteitä. Esimerkiksi Vaasaa sadan kilometrin säteellä ympäröineen hankinta-alueen pinta-ala oli noin puolet Valkeakoskea ympäröivän alueen koosta.

Laskenta-alueista Valkeakosken ympäristössä pienpuun kertymä oli suurin ja Vaasan ympäristössä pienin (kuva 2). Vaasan ympäristössä kertymä 100 kilometrin säteellä oli eri rajoitteilla 50 000–210 000 m³ vuodessa ja Valkeakosken alueella 250 000–890 000 m³ vuodessa. Kouvolan ympäristössä kertymät olivat likimain samalla tasolla kuin Valkeakoskella. Joensuun, Jyväskylän ja Kajaanin ympäristössä kertymät olivat 120 000–500 000 m³ vuodessa. Kuvassa 3 on esitetty vastaavat luvut pienpuun tehollisen energiasisällön mukaan (Hakkila 1978, Nurmi 1993). Laskelmassa pienpuun kosteus oli 38 %. Kuvissa 2 ja 3 esitetyt kertymät ovat potentiaalisia ja laskentaoletuksena oli, että kaikki kohteet saadaan tarvittaessa korjuun piiriin ja talteenotto korjuussa on



Kuva 2. Pienpuun saatavuus maan eri osissa eri kertymärajoitteilla.

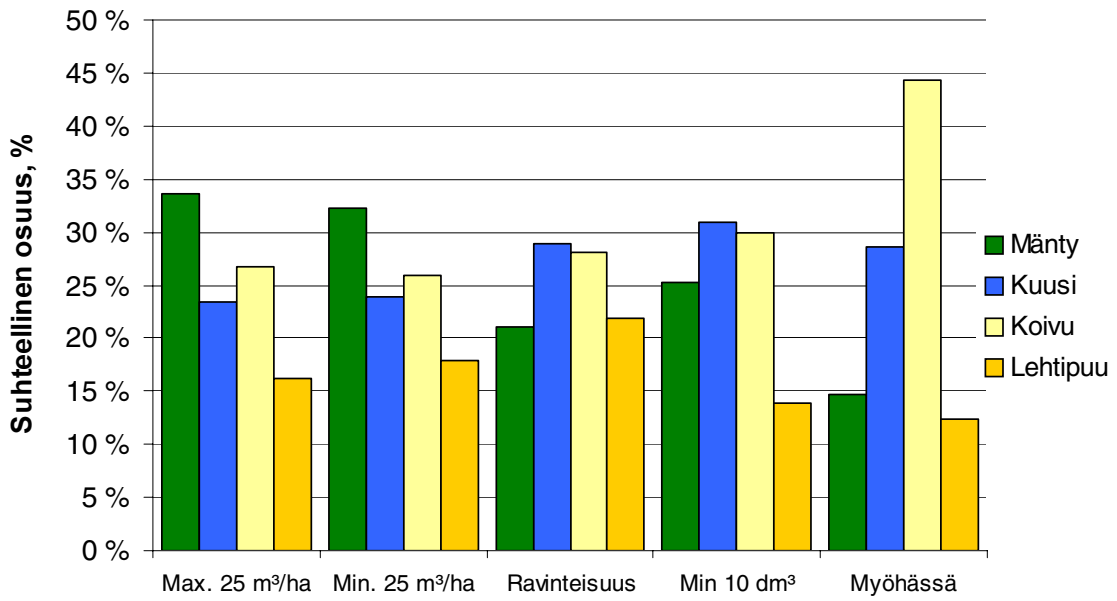


Kuva 3. Pienpuun saatavuus energiasisällön mukaan maan eri osissa eri kertymärajoitteilla. Pienpuun kosteus 38 %.

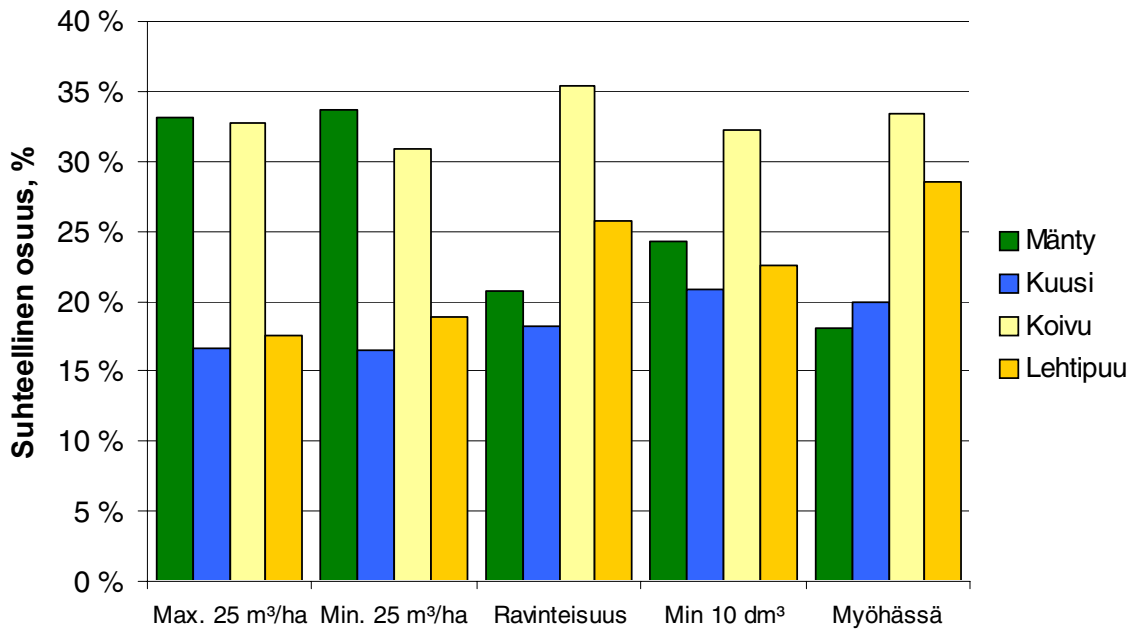
100 %. Käytännössä on kuitenkin ylioptimistista olettaa, että kaikki korjuukelpoiset kohteet tulevat markkinoille ja energiapuu saadaan talteen.

Kertymlaskelmissa käytetyt rajoitteet vaikuttivat energiapuukertymän puulajisuhteisiin (kuvat 4–10). Kasvupaikan viljavuudelle asetetut minimirajoitteet pienensivät männyn osuutta ja lisäsivät etenkin koivun ja muiden lehtipuiden osuutta kokonaiskertymästä. Pohjois-Suomessa ja Väli-Suomen alueella kertymä oli pääosin koivua. Etelä-Suomessa koivun suhteellinen osuus kertymästä oli pienempi ja muiden lehtipuiden sekä kuusen osuus vastaavasti taas suurempi. Itä-Suomessa muiden lehtipuiden osuus kertymästä oli suurempi kuin Länsi-Suomessa.

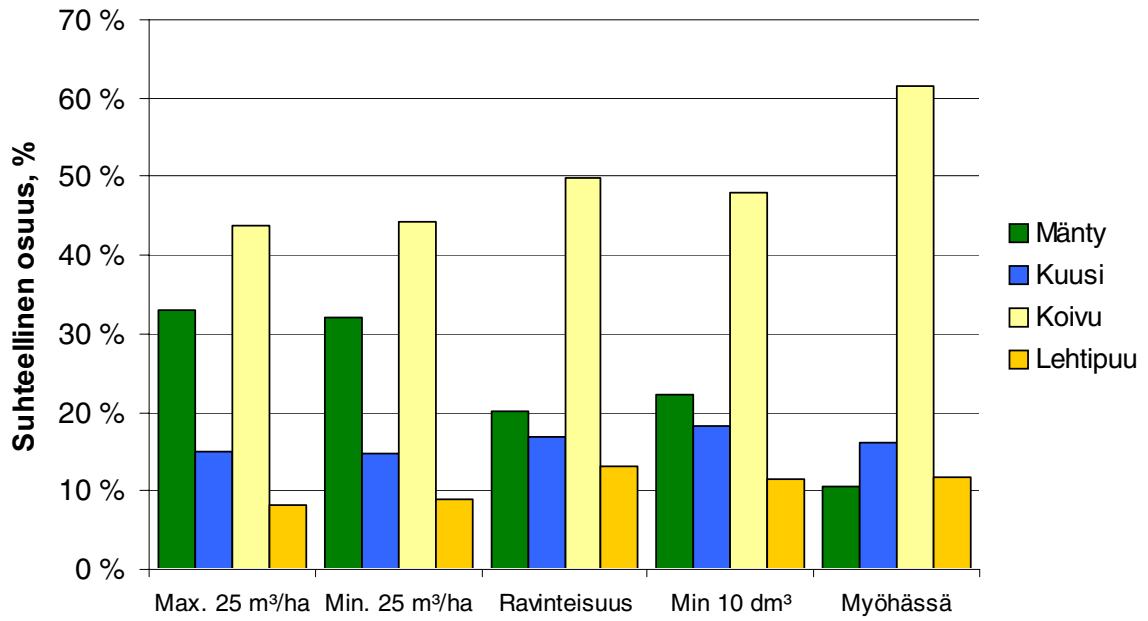
Rungon keskikoko oli nuorissa kasvatusmetsissä Rovaniemen ympäristöä lukuun ottamatta hieman yli 30 litraa (kuva 11). Yksittäisistä olosuhdetekijöistä juuri rungon keskikokoissa olevat erot aiheuttavat suurimmat erot metsähakkeen korjuukustannuksissa.



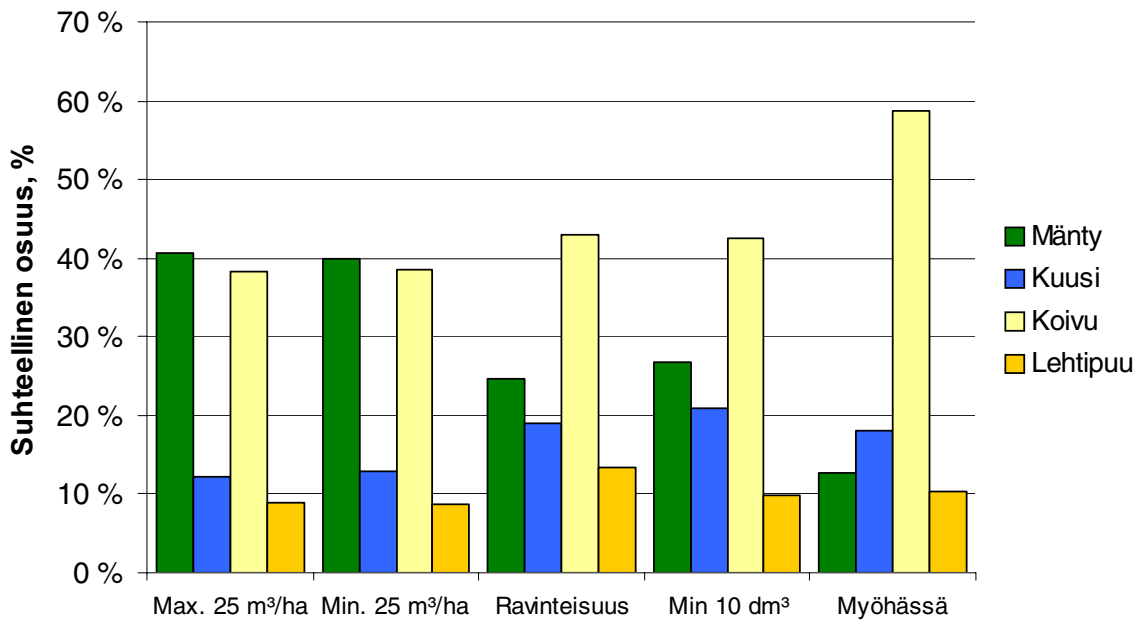
Kuva 4. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Jyväskylän* ympäristössä.



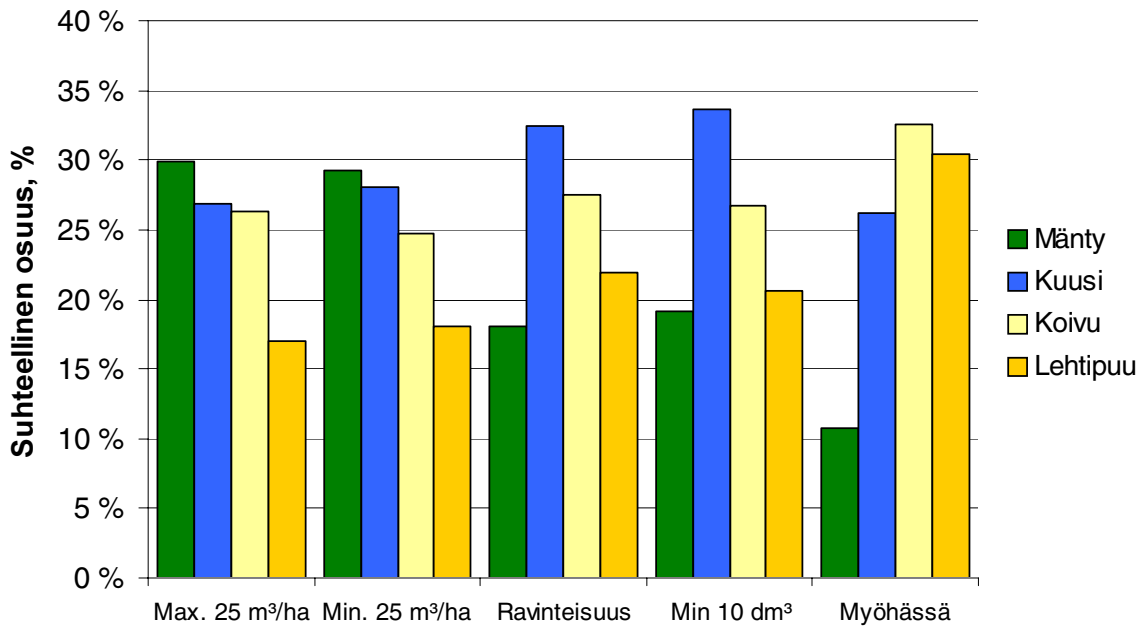
Kuva 5. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Joensuun* ympäristössä.



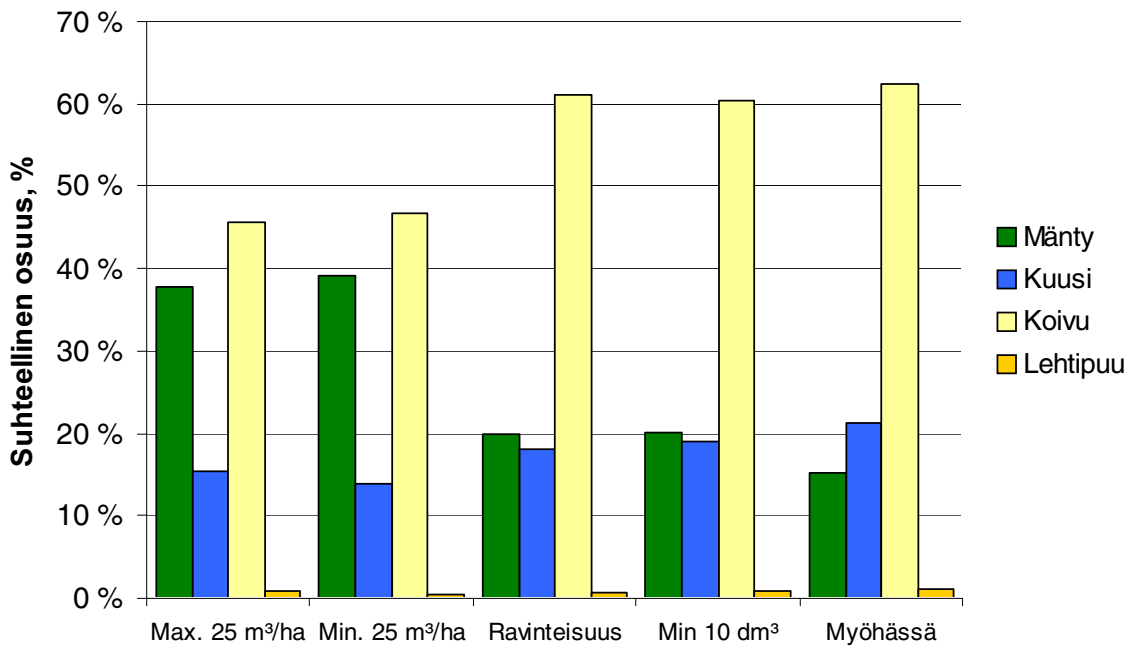
Kuva 6. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Kajaanin* ympäristössä.



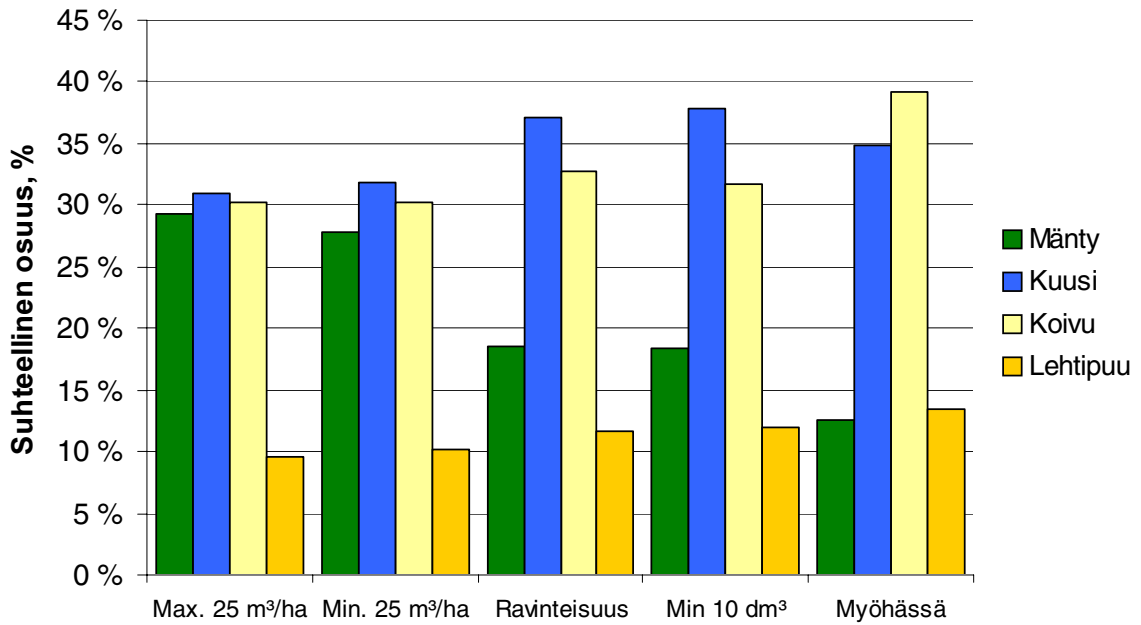
Kuva 7. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Vaasan* ympäristössä.



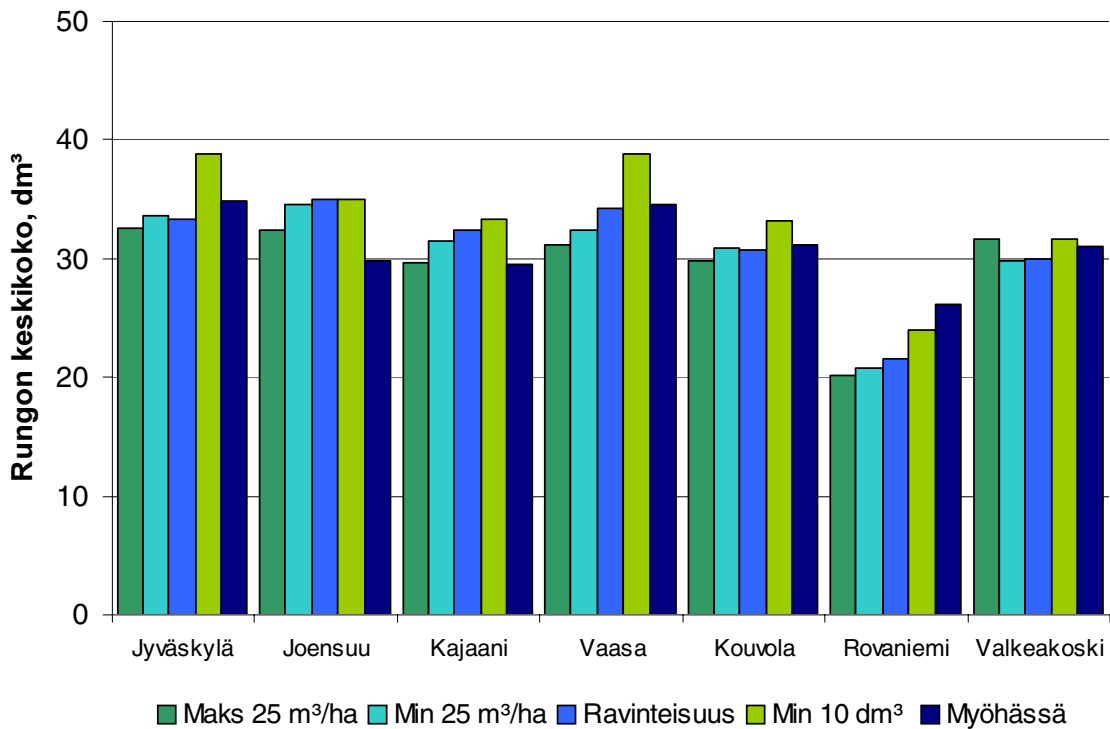
Kuva 8. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Kouvolan* ympäristössä.



Kuva 9. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Rovaniemen* ympäristössä.



Kuva 10. Puulajien suhteelliset osuudet pienpuukertymästä *Valkeakosken* ympäristössä.



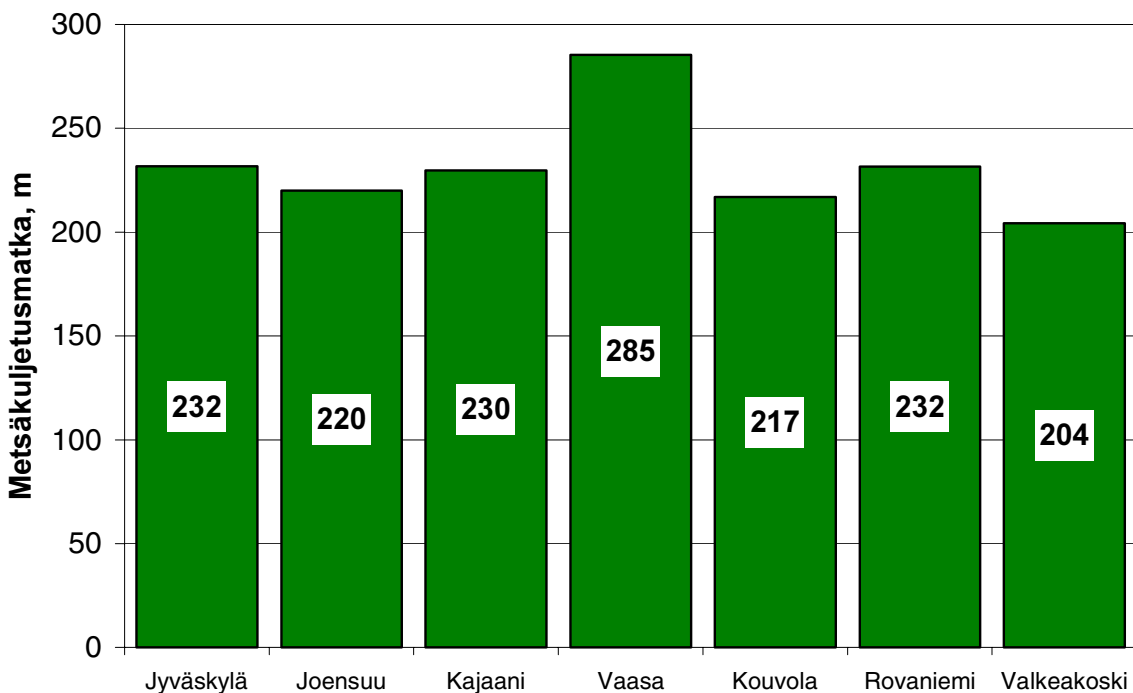
Kuva 11. Rajoitteiden vaikutus rungon keskipököön maan eri osissa.

2.3 Metsäkuljetusmatka ja työmaan koko

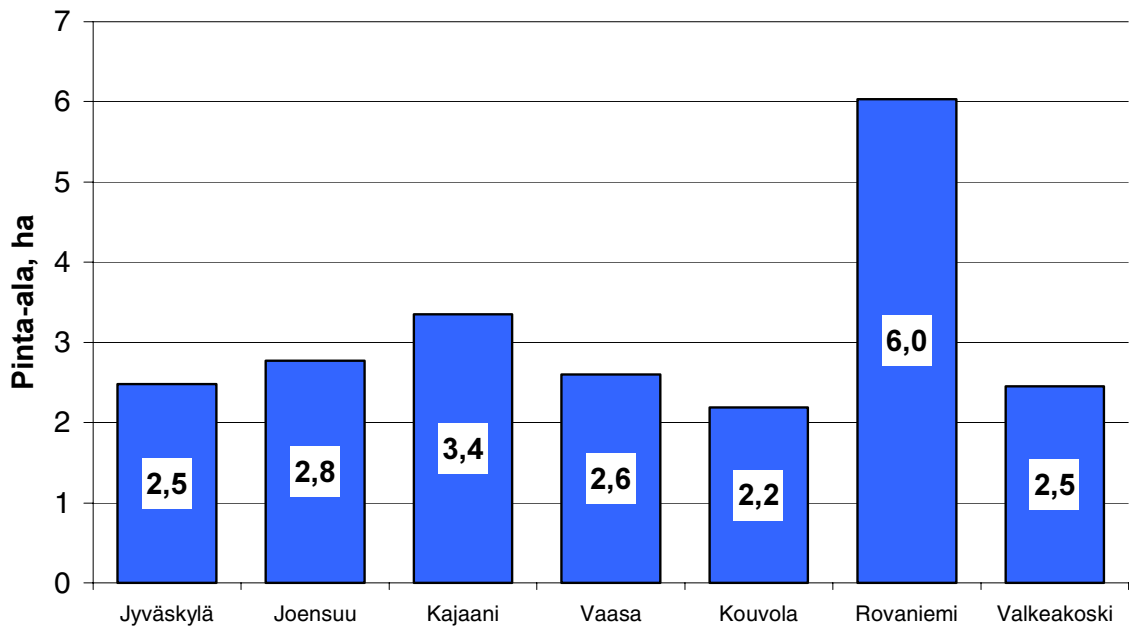
Metsäkuljetusmatkat ja työmaiden pinta-alat laskettiin metsäyhtiöiden leimikkotietojen pohjalta jokaiseen laskenta-alueen kuntaan. Laskenta-aineistona käytettiin kolmen suuren metsäyhtiön korjaamien päätehakuuleimikoiden leimikkotietoja yhden vuoden ajalta (Asikainen ym. 2001).

Metsäkuljetusmatkat ja työmaiden koot vaihtelivat Suomen eri osissa (kuva 12). Selvästi pisimmät metsäkuljetusmatkat olivat Vaasan ympäristössä, jossa keskimääräinen kuljetusmatka leimikolta tienvarteen oli 285 metriä. Maan muissa osissa metsäkuljetusmatka oli 205–230 metriä. Etelä-Suomessa oli suuremmasta tietiheystä johtuen vertailuryhmän lyhimmät metsäkuljetusmatkat. Pohjois-Suomessa käytetään paljon talviteitä, mikä selittää Rovaniemen ympäristön tietiheyyden verrattuna yllättävän lyhyttä keskikuljetusmatkaa. Kaukokuljetusmatkat käyttöpai- kalle laskettiin kunnan leimikoiden keskiarvona. Paikkatietotarkastelu tehtiin karttaohjelmalla ja kuljetusmatkat laskettiin tieverkkoa pitkin.

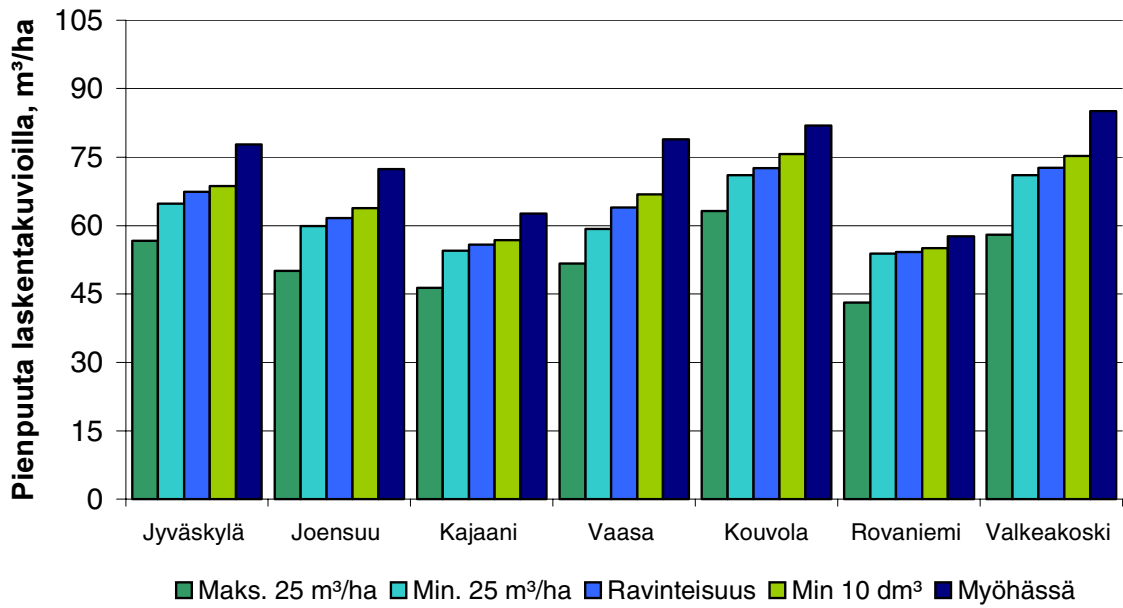
Työmaiden koko kasvoi etelästä pohjoiseen päin mentäessä, kun mittarina oli työmaan pinta-ala (kuva 13). Rovaniemen ympäristössä korjuukohteen pinta-ala oli 6 hehtaaria, kun Kouvolan ympäristössä työmaan keskikoko oli vain 2,2 hehtaaria. Ero tasoittuu hieman, kun huomioon otetaan pienpuun hehtaarikohtainen kertymä. Puustoisimmat työmaat olivat Kouvolan ja Valkeakosken ympäristössä (n. 65–70 m³/ha) ja vähäpuustoisimmat Rovaniemen ja Kajaanin ympäristössä (n. 55 m³/ha) (kuva 14).



Kuva 12. Keskimääräiset metsäkuljetusmatkat laskenta-alueittain.



Kuva 13. Työmaiden keskimääräiset pinta-alat laskenta-alueittain.



Kuva 14. Rajoitteiden vaikutus pienpuun määrään laskentakuviolla.

3 Pienpuun korjuuketjujen tuottavuudet

3.1 Timberjack 720 keräävän energiapuukouran aikatutkimukset

Esiteltävät tulokset ja työvaiheittaiset tuottavuusfunktiot pienpuun koneellisesta kaato-kasauksesta perustuvat Timberjack 720 keräävästä energiapuukourasta tehtyihin aikatutkimuksiin. Tutkittu laite on joukkokäsittelykoura, jossa puut katkaistaan veitsiterällä ja tartuntakourien avulla se voi pidellä useita pystyasentoisia puita samanaikaisesti. Puiden joukkokäsittelyllä pyritään vähentämään kuormaimen liikkeitä ja siten tehostamaan koneen tuottavuutta (mm. Granvik 1993, Erikson ja Norden 1999, Tanttu 1999, Johansson ym. 2003, Bergkvist 2003).

Käytännön työssä pyritään siihen, että kouraan kerätään puun koosta ja puulajista riippuen 2–5 runkoa kerrallaan. Kouran tullessa täyteen puukimppu lasketaan alas ja kasataan ajouran varteen. Metsäkuljetusta varten puut katkotaan noin 5–6 metrin pituisiksi. Pitkät ja järeämmät puut katkotaan kahdessa vaiheessa. Ensiksi pystyssä olevista puista katkaistaan latvaosa, jonka jälkeen kerätään jäljelle jääneet tyvikappaleet. Riukupuut voidaan myös kaataa kokopitkinä runkoina ja katkoa metsäkuljetuspiteuteen kourakasalla monta runkoa kerrallaan.

Keräilevä kaatopää asennetaan harvesteriin normaalin hakkuupään tilalle. Koura painaa 340 kg. Sen korkeus on 89 cm, leveys kouran ollessa auki 83 cm ja 60 cm kouran ollessa kiinni. Yläkouran suurin avauma on 62 cm ja alakouran 53 cm. Suurin katkaisuläpimitta on 20 cm (www.timberjack.fi 2003). Peruskoneena käytetään harvesteria, joka pystyy työskentelemään 20 metrin



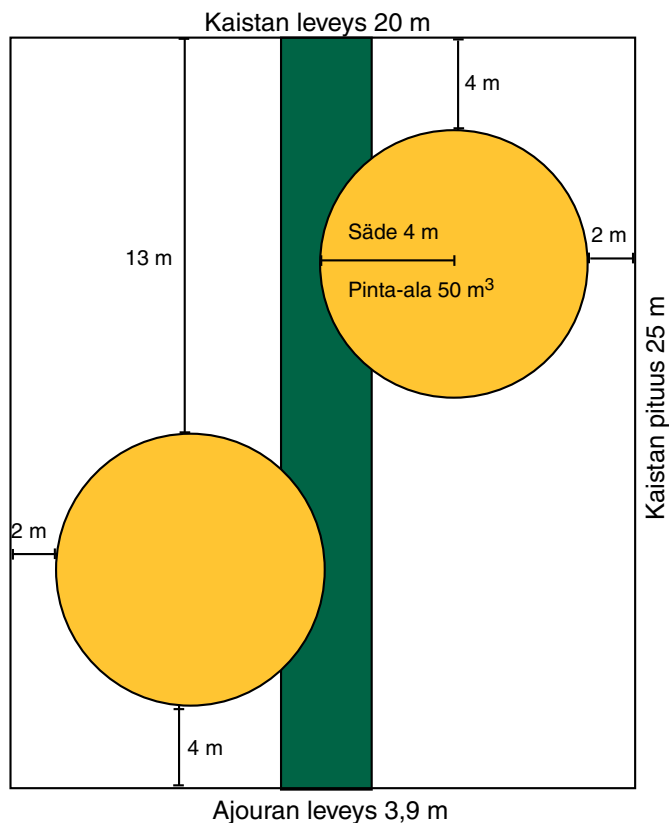
Kuva 15. Timberjack 720 keräävä energiapuukoura nuoren männikön harvennuksella (J. Laitila 2002).

ajouravälillä. Tutkittu energiapuukoura oli asennettu talvikokeissa Timberjack 870 ja kesäkokeissa Valmet 901 harvesteriin. Kuljettaja oli molemmilla alustakoneilla sama ja työmaat olivat keskipohjalaisia nuoria mänty-koivu-sekametsiä.

Aikatutkimuksissa kaato-kasauskoneen tehoaika jaettiin eri työvaiheisiin. Kaato-kasaukseen kuului 62 % tehoajasta ja latvojen katkontaan, keräilyyn ja kasaukseen 21 % tehoajasta. Työpistesiirottojen osuus tehoajanmenekistä oli 12 % ja runkojen kasalla katkontaan osuus 5 %. Ajanmenekki määritettiin tehoaikana, joka ei sisältänyt mitään keskeytyksiä sekä käyttöaikana, joka sisälsi alle 15 minuutin keskeytykset. Tuottavuus teho- ja käyttötuntia kohden saatiin laskettua jakamalla kokopuun poistuma koealakohtaisella ajanmenekillä.

Energiapuuharvesterin tuottavuustutkimuksessa ajanmenekki mitattiin koealoilta, joiden pituus oli 25 metriä ja leveys 20 metriä. Hakkupuostuman selvittämiseksi/arvioimiseksi aikatutkimuskoealalle sijoitettiin systemaattisesti kaksi puustokoealaa, yksi ajouran kummallekin puolelle (kuva 16). Ympyräkoealat kattoivat 20 prosenttia aikatutkimuskoealan pinta-alasta ja niillä ajouran ja harvennusalan pinta-alasuhde oli sama kuin aikatutkimuskoealoilla.

Ympyräkoealoilta mitattiin poistettujen ja kasvatettavan puuston runkoluku puulajeittain, aliskasvoksen määrä sekä jäävän puuston pituus ja pohjapinta-ala. Kaadetuista puista mitattiin puulajeittain kantoläpimitta ja koepuista pituus ja rinnankorkeusläpimitta puustotunnusten (Hakkila 1991, Laasasenaho 1982, Näslund 1937) ja koealakohtaisen hakkupuostuman laskemiseksi.



Kuva 16. Puustokoealojen sijoittuminen aikatutkimuskoealalle.

Aikatutkimuskoealoja oli yhteensä 89. Puiden keskikoko koealoilla oli välillä 4,5–58 dm³ ja poistuman tiheys oli 300–5000 puuta hehtaarilla. Koelaitoksen hakkuupoistuman määrittämiseksi mitattiin yhteensä yli 7000 kaadetun puun kantoläpimitat. Aikatutkimuksia tehtiin sekä kesä- että talviolosuhteissa.

3.1.1 Työpistesiirto

Kaatokasauskoneen puukohtainen siirtymisaika (sekuntia per puu) työpisteeltä toiselle määritettiin poistettavien puiden tiheyden funktiona (kuva 17). Työvaihe alkaa, kun kone lähtee liikkeelle ja päättyy, kun kaatokasauskouran siirto poistettavalle puulle alkaa.

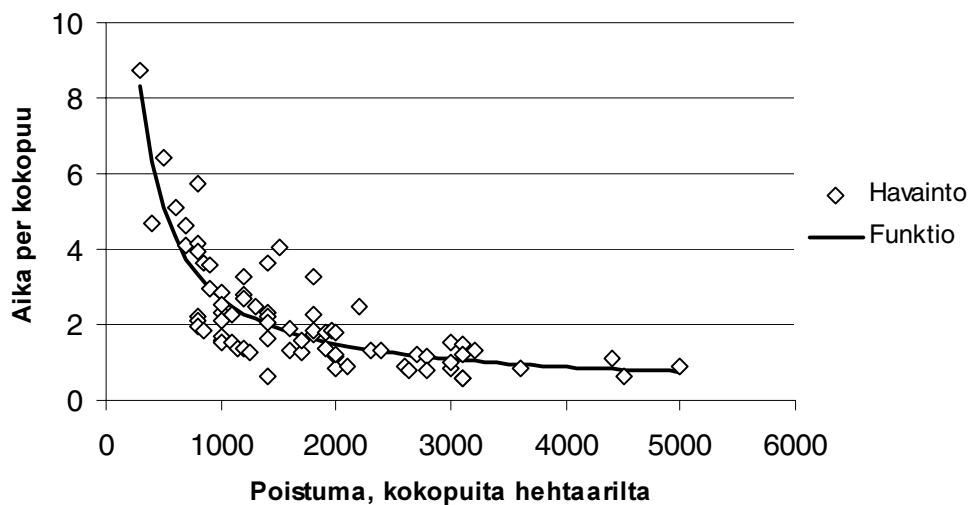
Kaatokasauskoneen työpistesiirron ajanmenekifunktio on muotoa:

$$T_{Siirt.} = 0,277 + \frac{2412,301}{x}$$

$T_{Siirt.}$ = Siirtymisaika per kokopuu, s

x = Poistuman tiheys, kokopuita/ha

r^2 = 0,71



Kuva 17. Poistuman tiheyden vaikutus puukohtaiseen siirtymisajanmenekkiin.

3.1.2 Pienpuun prosessointi

Pienpuun prosessointiaika tarkoittaa tässä tutkimuksessa kokopuiden kaadon, keräilyn ja metsäkuljetuspituuteen katkonnan ajanmenekkiä.

Joukkokäsittelyn tuottavuuteen vaikuttaa käsiteltävien kokopuiden tilavuus (runko + elävä latvusmasa) ja kappalemäärä kourataakassa. Kourataakassa olevien kokopuiden kappalemäärän laskemiseksi laadittiin malli, jonka selittäviksi tekijöiksi valittiin poistuman tiheys ja kokopuun keskitilavuus.

$$y = 2,488 + 0,000667x - 0,03368v$$

y = Kokopuita kourassa per joukkokäsittelykerta

x = Poistuman tiheys, kokopuita/ha

v = Kokopuun keskitilavuus, dm³

$$r^2 = 0,43$$

Kokopuun käsittelyaikaa kuvaavan mallin (sekuntia per puu) selittävinä tekijöinä oli puun keskikoko ja kourataakassa olevien runkojen määrä.

$$T_{Käsitt.} = 22,815 + 0,0312v - 3,373y$$

$T_{Käsitt.}$ = Kokopuun käsittelyaika, s/kokopuu

v = Kokopuun keskitilavuus, dm³

y = Kokopuita kourataakassa, kpl

$$r^2 = 0,64$$

Taulukko 1. Kokopuun tilavuus pituuden ja rinnankorkeuden mukaan (Hakkila 1991, Laasasenaho 1982).

Pituus ja rinnankorkeus lpm.	Mänty, dm ³	Kuusi, dm ³	Koivu, dm ³
5 m & 5 cm	8	12	7
7 m & 7 cm	20	25	16
9 m & 9 cm	39	48	33
11 m & 11 cm	66	80	58
13 m & 13 cm	104	126	95

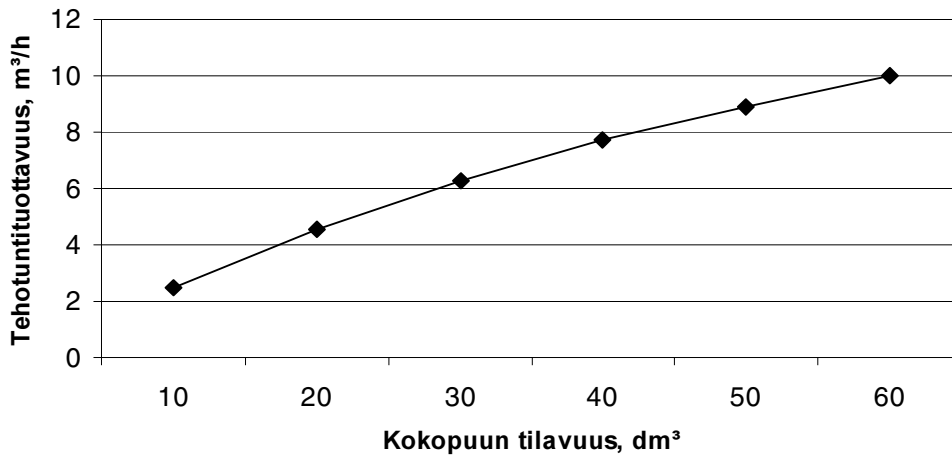
3.1.3 Tulosten tarkastelu

Kokopuun kaatokasauksen ajanmenekki, T_{Koko} , sekuntia per puu, saadaan osavaiheiden summana.

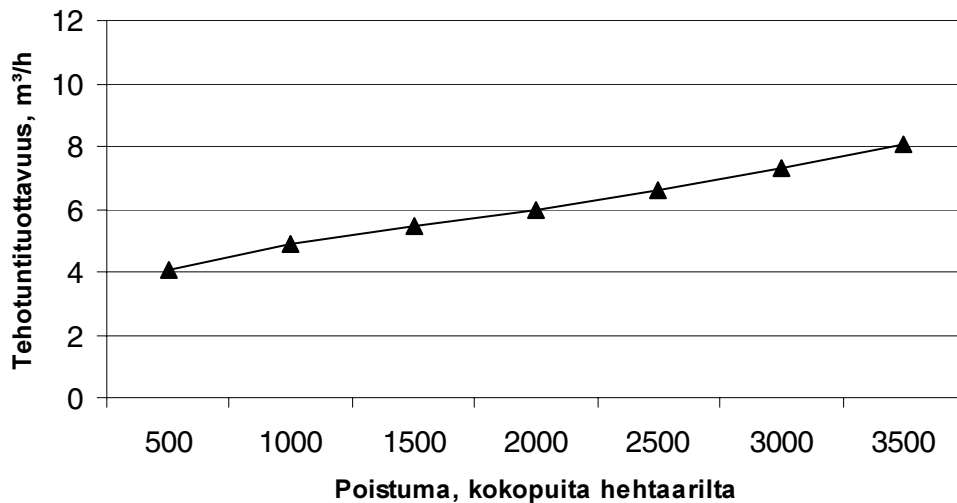
$$T_{Koko} = T_{Siirt.} + T_{Käsitt.}$$

Tehotuntituottavuus, m³/h, saadaan jakamalla kokopuun tilavuus puukohtaisella ajanmenekillä.

Kuvissa 18 ja 19 on tarkasteltu kokopuun tilavuuden ja poistuman tiheyden vaikutusta koneellisen kaatokasauksen tuottavuuteen. Kuvassa 18 puun tilavuus on 10–60 dm³ poistuman kappalemäärän pysyessä vakiona (1500 kokopuuta hehtaarilta). Kuvassa 19 puun tilavuus pysyy vakiona (25 litraa) mutta poistettavien puiden lukumäärä kasvaa 500:sta 3500:een kappaleeseen hehtaarilta.



Kuva 18. Kokopuun tilavuuden vaikutus kaato-kasauskoneen tehotuntituottavuuteen.



Kuva 19. Poistuman tiheyden vaikutus kaato-kasauskoneen tuottavuuteen.

Kokopuun tilavuuden kasvu 10 dm³:stä 60 dm³:iin nosti kaato-kasauskoneen tehotuntituottavuutta kahdesta kiintokuutiosta kymmeneen kiintokuutioon tehotunnissa (kuva 18). Poistuman kasvu 500:sta 3500:een kokopuuhun hehtaarilta lisäsi kaato-kasauksen tuottavuutta neljästä kiintokuutiosta kahdeksaan kiintokuutioon (kuva 19).

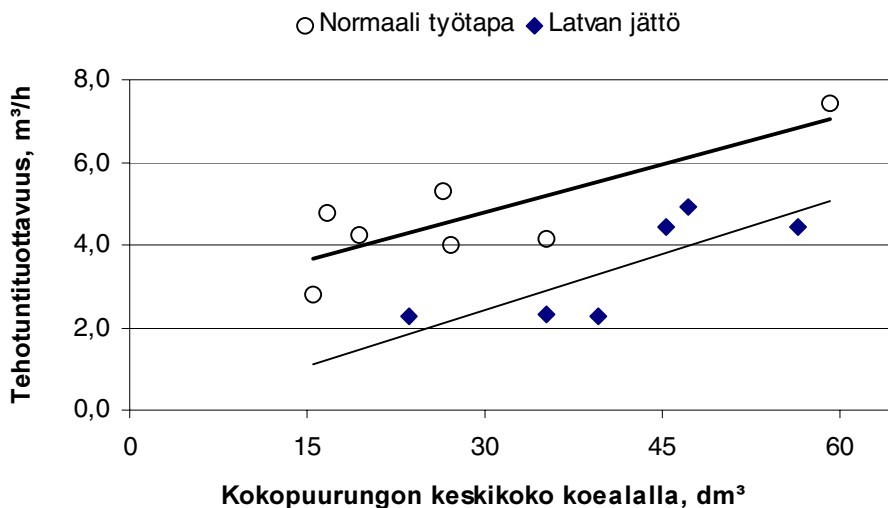
3.2 Osapuu- ja kokopuumenetelmän vaikutus Timberjack 720:n tuottavuuteen

Kaato-kasauskoneen aikatutkimusten ohessa selvitettiin vertailevalla aikatutkimuksella eroa tuottavuudessa, kun puuta korjataan metsäkuljetuspituuteen katkottuna kokopuuna, tai kuljetuspituuteen katkottuna osapuuna, josta on poistettu 1–3 metrin pituinen latvakappale. Osapuupuunakorjuussa kuljettaja katkoi puut tyveltä ja keräsi ne koneen kouraan muutaman puun taakoiksi. Kouran tullessa täyteen puukimppu laskettiin maahan, jonka jälkeen kuljettaja katkaisi taakan puista

latvakappaleet, siirsi latvukset kauemmaksi kourakasalta ja katkoi tarvittaessa osapuuringot vielä metsäkuljetuspituuteen. Latvuksen poistolla ja metsään jättämisellä pyrittiin pienentämään kokopuunakorjuun aiheuttamaa metsämaan ravinnehävikkiä.

Kone ja kuljettaja oli molemmilla työtavoilla sama ja harjaantunut molempiin työtapoihin. Tutkimusaineisto oli 13 aikatutkimuskoealaa, joista kuudella jätettiin latvakappale metsään ja seitsemällä koealalla puut korjattiin normaalisti kokopuuna metsäkuljetuspituuteen katkottuna. Olosuhteet olivat pareittaisten vertailukoealojen välillä samanlaiset ja vertailukelpoiset.

Työtapa, jossa latvakappale jätettiin metsään, alensi kaato-kasauskoneen tuottavuutta keskimäärin $2 \text{ m}^3/\text{tehotunnissa}$ (kuva 20). Tuottavuuden aleneminen johtui siitä, että kaato-kasauksen ajanmenekki kasvoi ylimääräisen työvaiheen takia (latvan katkaisu ja pois siirto), samalla kun kaato-kasattavien puiden keskikoko pieneni latvan poiston myötä noin 15 %:lla.



Kuva 20. Työtavan ja rungon koon vaikutus kaato-kasauskoneen tuottavuuteen.

3.3 Pienpuun metsäkuljetuksen aikatutkimukset

Pienpuun metsäkuljetuksesta tehtiin aikatutkimuksia sekä metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen että konetyönä tehdyn kaato-kasauksen jälkeen. Aikatutkimusten perusteella tehtiin ajanmenekifunktiot ja metsäkuljetuksen tuottavuus määritettiin tilavuusyksikköä (m^3) kohden. Ajanmenekifunktiot sidottiin helposti saatavilla oleviin työmaatietoihin, kuten metsäkuljetusmatkaan, hakkuupoistumaan, kaato-kasaustapaan sekä metsätraktorin kuormakokoon. Tutkittuja kuormia oli 97, joista metsurihakkuun jälkeisiä kuormia oli 46 ja koneellisen kaato-kasauksen jälkeisiä kuormia 51. Metsätraktorin kuormakoko määritettiin joko kuormittain kuormainvaa'an avulla tai työmaakohtaisina keskiarvoina, sen jälkeen kun pienpuu oli haketettu ja toimitettu voimalaitokselle.

Metsäkuljetus jaettiin viiteen työvaiheeseen: tyhjänäajo palstalle, kuormaus, kuormausajo, kuormattuna-ajo purkupaikalle ja kuorman purku. Ajanmenekki määritettiin tehoaikana, joka ei sisältänyt mitään keskeytyksiä sekä käyttöaikana, joka sisälsi alle 15 minuutin keskeytykset (Haarlaa ym. 1984, Mäkelä 1986, Kuitto ym. 1994).

Tyhjänäajo alkoi, kun traktori lähti liikkeelle kuorman purkupaikalta ja päättyi, kun traktori pysähtyi ensimmäiselle kuormattavalle kourakasalle. Kuormaus alkoi, kun traktori pysähtyi ensimmäiselle kuormattavalle kourakasalle ja aloitti kuormauksen. Kuormaus päättyi, kun viimeinen kuormattava kourataakka nostettiin kyytiin ja kuormain siirrettiin ajoasentoon. Kuormaukseen kuuluivat kuormaimen vienti- ja tuontiliikkeet, kasaus, kuormassa järjestely ja mahdolliset muut kuormauksen aputoimenpiteet. Kuormausajoon kuuluivat siirtyminen kasojen välillä. Kuormattuna-ajo alkoi, kun metsätraktori lähti liikkeelle kuormauksen päätyttyä ja loppui, kun metsätraktori pysähtyi purkupaikalle. Kuorman purku alkoi, kun metsätraktori oli pysähtynyt purkupaikalle ja päättyi, kun kuorma oli tyhjä ja traktori lähti liikkeelle kuormanpurkupaikalta. Purkuvaiheeseen kuuluivat kasan järjestely ja siirtymiset varastolla (Asikainen ym. 2001).



Kuva 21. Pienpuukuorman purkua tienvarsivarastolla (J. Laitila 2002).

3.3.1 Tyhjänäajo

Metsätraktorin tyhjänäajon ajanmenekkipunktiossa selittävänä tekijänä oli metsäkuljetusmatka (kuva 22). Tyhjänäajon ajanmenekkipunktio on muotoa:

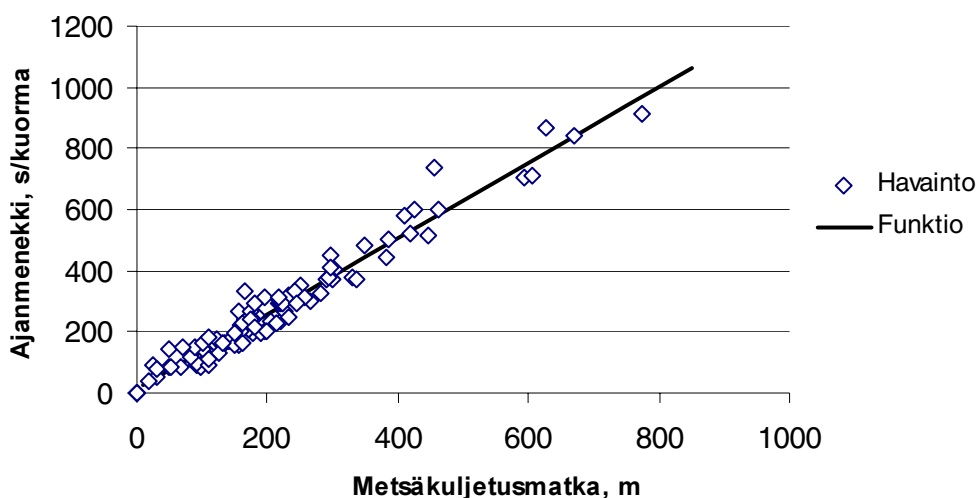
$$T_{\text{Tyh.ajo}} = \frac{10,868 + 1,241l_t}{v_k}$$

$T_{\text{Tyh.ajo}}$ = Tyhjänäajon ajanmenekki, s/m³

l_t = Tyhjänäajomatka, m

v_k = Kuormakoko, m³

r^2 = 0,96

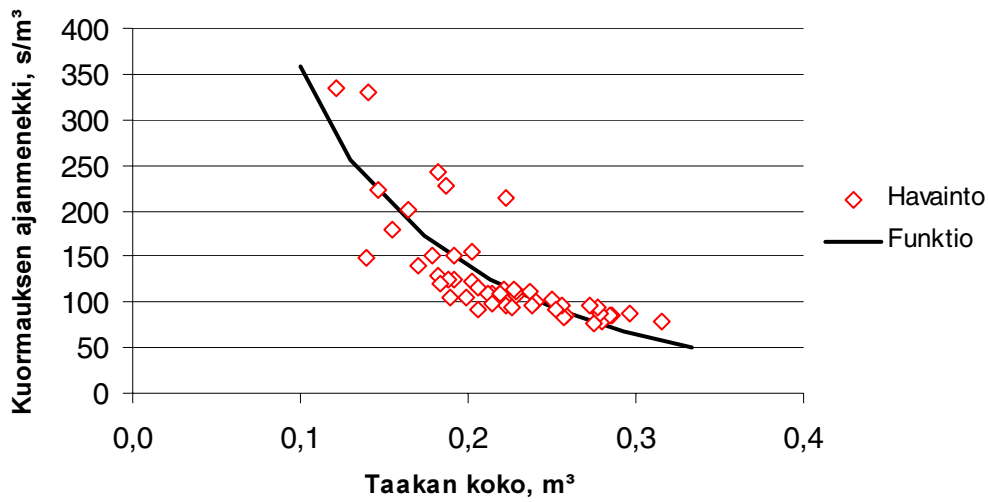


Kuva 22. Metsäkuljetusmatkan vaikutus tyhjänäajon ajanmenekkiin.

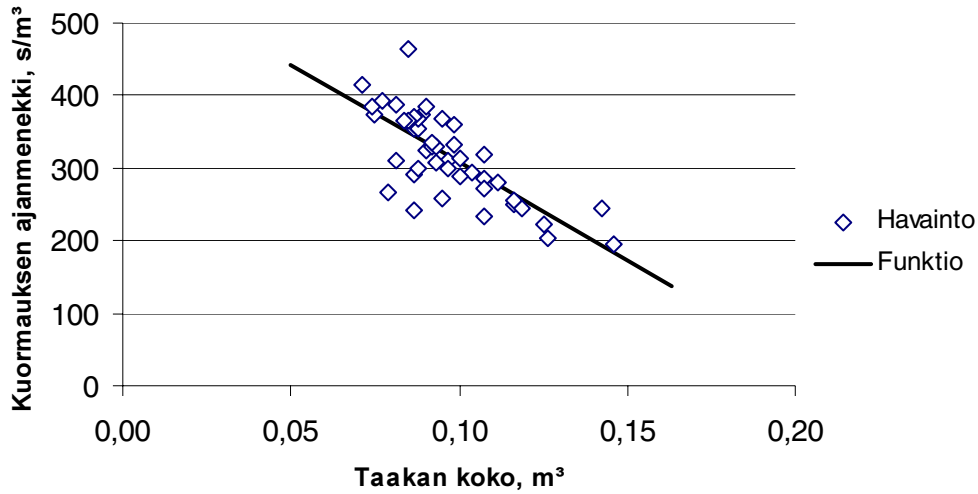
3.3.2 Pienpuun kuormaus

Kuormauksen ajanmenekkipunktiot laadittiin sekä miestyönä että konetyönä kaato-kasatulle pienpuulle. Kuormauksen ajanmenekkiin vaikutti kuormauksen taakkakoko, joka oli koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä suurempi kuin metsurihakuun jäljiltä (kuvat 23 ja 24). Koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä kourakasat ovat suuria, mikä tehostaa kuormaustyötä. Miestyönähakuun jäljiltä kourakasat ovat pienempiä ja kasat ovat levittäytyneet suomumaisina muodostelmina laajemmalle alueelle, mikä hidastaa kuorman tekoa.

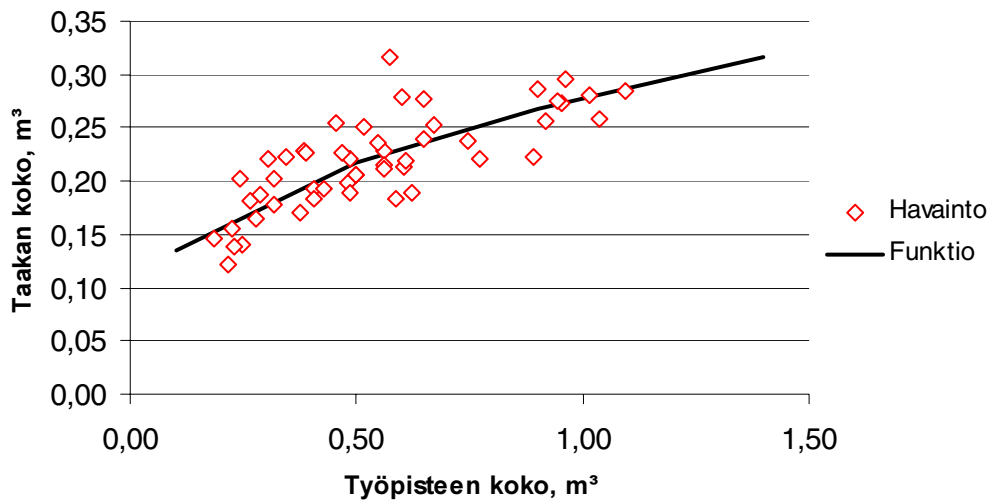
Kourataakan koko johdettiin työpisteen koon perusteella (kuvat 25 ja 26). Työpisteen koko, eli samalta paikalta kuormatun pienpuun määrä, laskettiin ajouravarsitiheyden (pienpuupoistuma per 100 m ajouraa) perusteella (kuvat 27 ja 28).



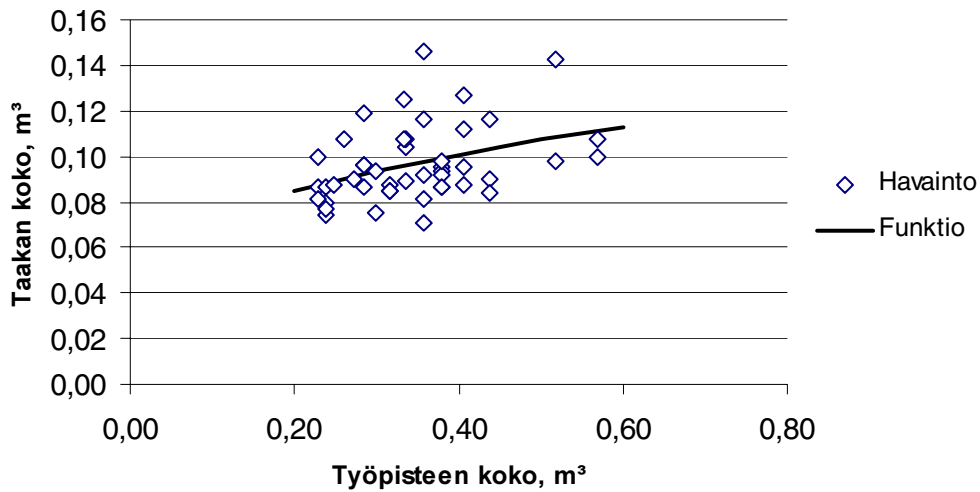
Kuva 23. Kourataakan koon vaikutus kuormauksen ajanmenekkiin. Kuormaus koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä.



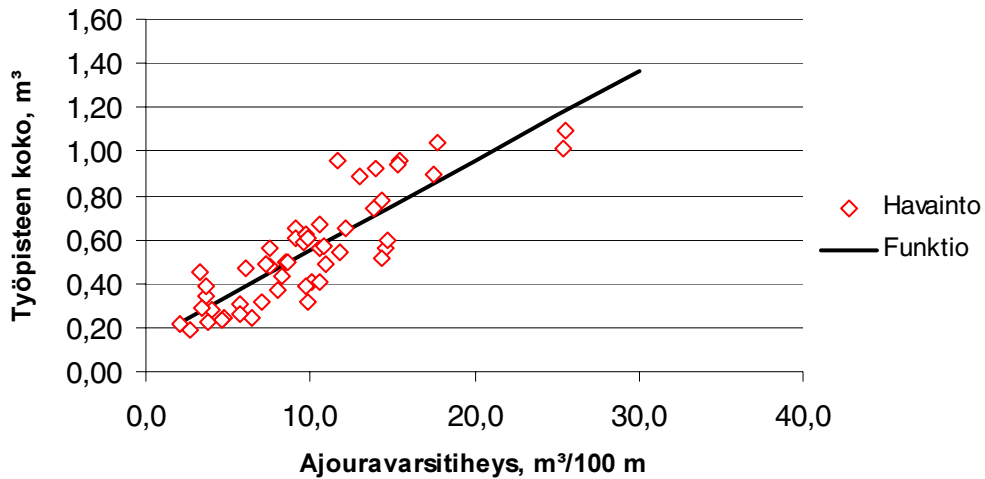
Kuva 24. Kourataakan koon vaikutus kuormauksen ajanmenekkiin. Kuormaus metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jälkeen.



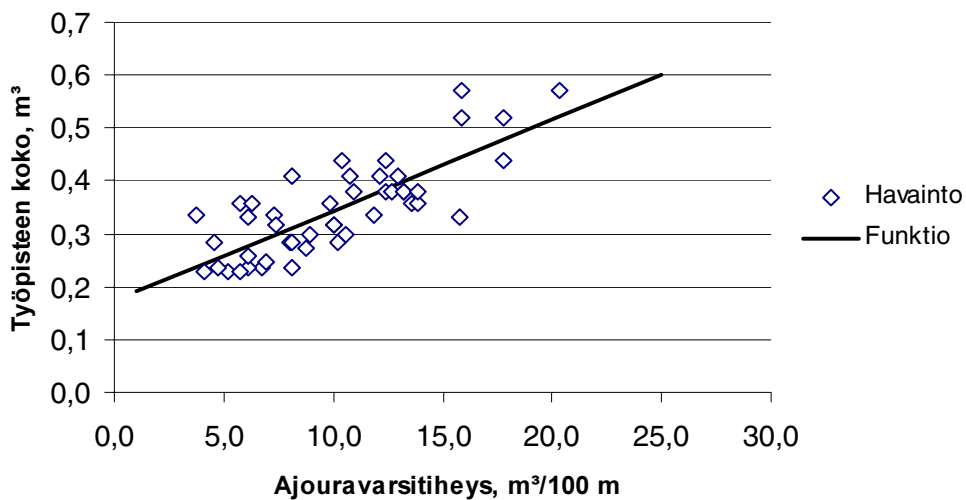
Kuva 25. Työpisteen koon vaikutus taakan kokoon koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä.



Kuva 26. Työpisteen koon vaikutus taakan kokoon metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä.



Kuva 27. Työpisteen koko ajouravarsitiheyden mukaan koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä.



Kuva 28. Työpisteen koko ajouravarsitiheyden mukaan metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä.

Pienpuun kuormauksen ajanmenekki funktio koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä on muotoa:

$$T_{Kuorm.kk} = -81,429 + \frac{43,906}{V_{tkk}}$$

$T_{Kuorm.k}$ = Kuormauksen ajanmenekki koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä, s/m³

v_{tkk} = Taakan koko, m³

r^2 = 0,65

Pienpuun kuormauksen ajanmenekki funktio metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä on muotoa:

$$T_{Kuorm.mets.} = 577,786 - 2698,685v_{tmets}$$

$T_{Kuorm.mets.}$ = Kuormauksen ajanmenekki koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä, s/m³

v_{tmets} = Taakan koko, m³

r^2 = 0,57

Taakan koko lasketaan koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä seuraavasti:

$$V_{tkk} = 0,0678 + 0,21 * \sqrt{x_{kk}}$$

v_{tkk} = Taakan koko koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä, m³

x_{kk} = Työpisteen koko kaato-kasauksen jäljiltä, m³

r^2 = 0,62

Taakan koko lasketaan metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä seuraavasti:

$$V_{tmets} = 0,04607 + 0,08652 * \sqrt{x_{mets}}$$

v_{tmets} = Taakan koko metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä, m³

x_{mets} = Työpisteen koko metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä, m³

r^2 = 0,14

Työpisteen koko lasketaan koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä seuraavasti:

$$x_{kk} = 0,138 + 0,04107z$$

x_{kk} = Työpisteen koko koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä, m³

z = Ajouravarsitiheys, m³/100m

r^2 = 0,74

Työpisteen koko lasketaan metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä seuraavasti:

$$x_{mets} = 0,174 + 0,01704z$$

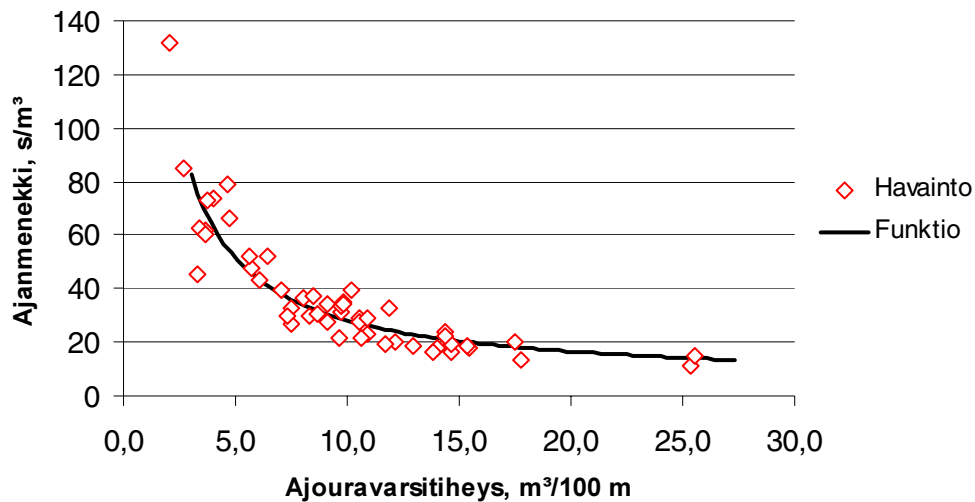
x_{mets} = Työpisteen koko metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä, m³

z = Ajouravarsitiheys, m³/100m

r^2 = 0,62

3.3.3 Kuormausajo

Miestyönä ja konetyönä kaato-kasatulle pienpuulle laadittiin kuormausajon ajanmenekki funktiot (kuvat 29 ja 30). Kuormausajolla tarkoitetaan metsätraktorin siirtymistä kuormauksen yhteydessä kuormauspisteeltä toiselle (Kahala 1979, Kuitto ym 1994). Ajanmenekki funktioissa selittävä tekijänä oli ajouranvarsitiheys. Kuormausajoaika on selvästi riippuvainen leimikon energiapuutiheydestä. Tämä johtuu siitä, että samalta paikalta kuormattava energiapuumäärä vaihtelee tiheyden mukaan, jolloin siirtymiskertojen lukumäärä kuormattua yksikköä kohti muuttuu.



Kuva 29. Kuormausajon ajanmenekki koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä.

Kuormausajon ajanmenekki funktio pienpuun koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä on muotoa:

$$T_{Ka-k} = 4,925 + \frac{233,094}{z}$$

T_{Ka-k} = Kuormausajon ajanmenekki koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä, s/m³

z = Ajouravarsitiheys, m³/100 metriä

r^2 = 0,88

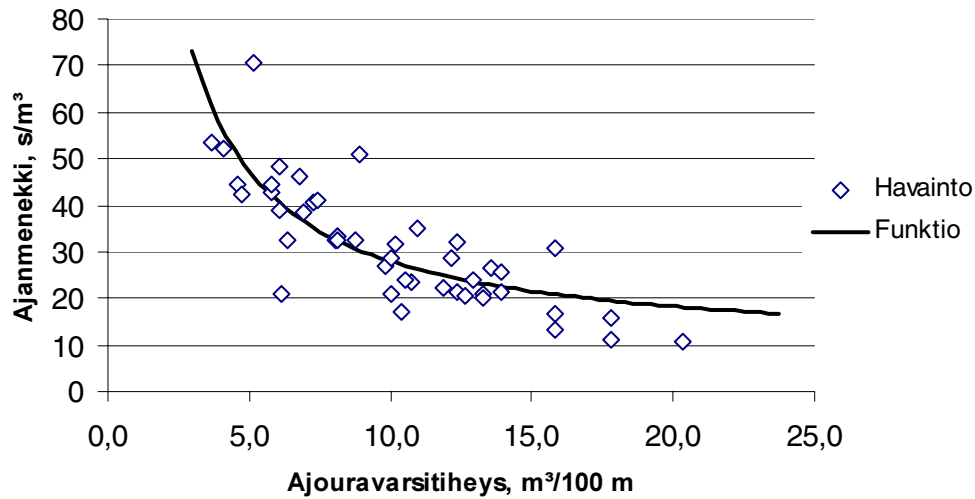
Kuormausajon ajanmenekki funktio pienpuun metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä on muotoa:

$$T_{Ka-m} = 8,626 + \frac{193,525}{z}$$

T_{Ka-m} = Kuormausajon ajanmenekki metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä, s/m³

z = Ajouravarsitiheys, m³/100 metriä

r^2 = 0,65



Kuva 30. Kuormausajon ajanmenekki metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä.

3.3.4 Kuormattuna-ajo

Metsätraktorin kuormattuna-ajon ajanmenekkipunktiossa selittävänä tekijänä oli metsäkuljetusmatka (kuva 31).

Kuormattuna-ajon ajanmenekkipunktio on muotoa:

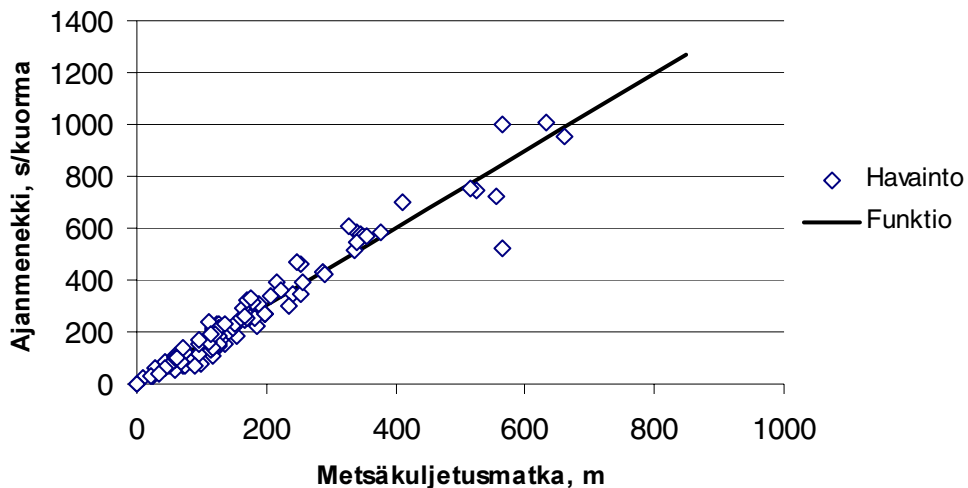
$$T_K = \frac{3,99 + 1,493/l_k}{v_k}$$

T_K = Kuormattuna-ajon ajanmenekki, s/m³

l_k = Kuormattuna-ajon matka, m

v_k = Kuormakoko, m³

r^2 = 0,94



Kuva 31. Kuormattuna-ajon ajanmenekki metsäkuljetusmatkan mukaan.

3.3.5 Kuorman purku

Pienpuun purkamisen ajanmenekkiin vaikuttaa kalusto, purettava materiaali sekä purkupaikan olosuhteet. Pienpuun purkamisen ajanmenekki-funktiossa selittävänä tekijänä oli purkutaakan koko. Aikatutkimusaineistossa purkutaakkojen keskikoko oli 0,6 m³.

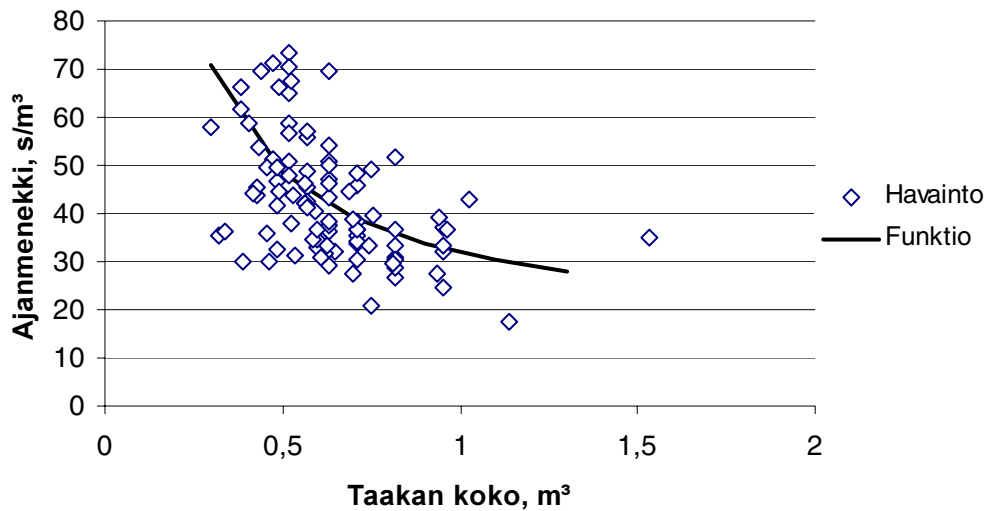
Pienpuukuorman purkamisen ajanmenekki-funktio on muotoa:

$$T_p = 15,154 + \frac{16,689}{v_p}$$

T_p = Purkamisen ajanmenekki, s/m³

v_p = Purkutaakan koko, m³

$r^2 = 0,28$



Kuva 32. Kuorman purkamisen ajanmenekki purkutaakan koon mukaan.

3.3.6 Tulosten tarkastelu

Pienpuun metsäkuljetuksen tehoajan ajanmenekki T_{Tot} , s/m³, saadaan osavaiheiden summana.

$$T_{Tot} = T_{Tyh.äjo} + T_{Kuorm.} + T_{Ka.} + T_K + T_p$$

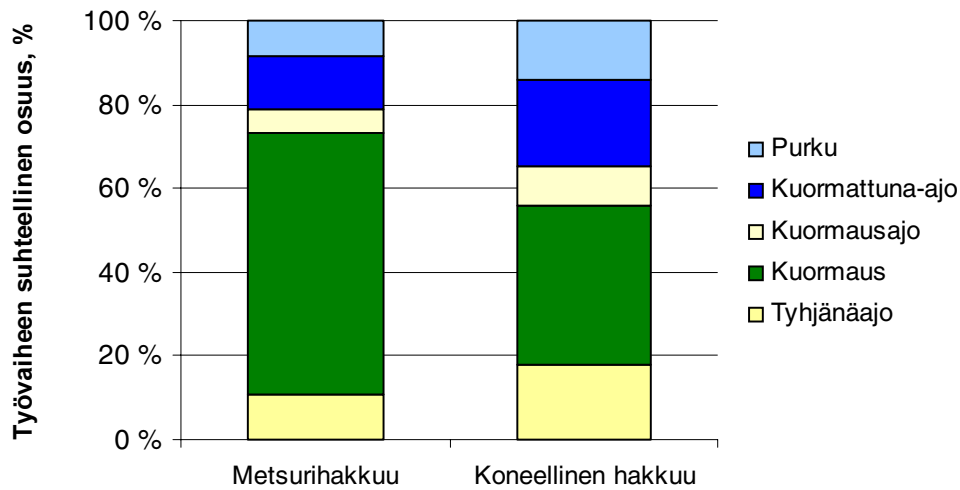
Kuormakohtainen ajanmenekki (T_{Kuorma}) saadaan kertomalla kuutiometrikohtainen ajanmenekki (T_{Tot}) kuormakoolla, v_k .

$$T_{Kuorma} = T_{Tot} \times v_k$$

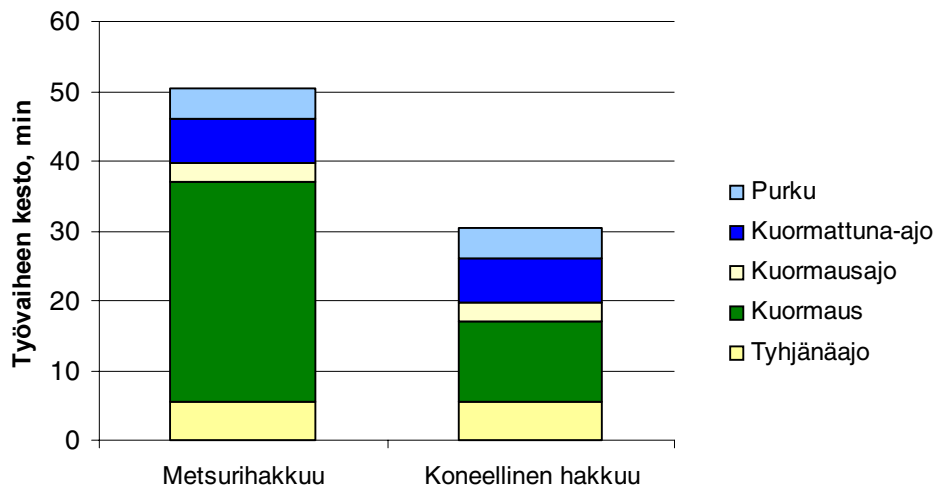
Kuvassa 33 on työvaiheittaiset ajanmenekki-jakaumat pienpuun metsäkuljetukselle, kun kaato-kasaus on tehty joko metsurityönä tai koneellisesti. Laskelmassa metsäkuljetusmatka oli 250 m, pienpuun hehtaarikohtainen poistuma 60 m³ ja metsätraktorin kuormakoko 6 m³.

Kuormauksen osuus kokonaisajanmenekistä on 63 %, kun kaato-kasaus on tehty metsurityönä. Koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä kuormauksen osuus kokonaisajanmenekistä on 38 %. Koneellisen kaato-kasauksen jälkeisessä metsäkuljetuksessa kuormattuna- ja tyhjänäajon sekä purkamisen suhteellinen osuus kokonaisajanmenekistä on suurempi kuin metsurihakuun jälkeisessä metsäkuljetuksessa.

Kun pienpuun metsäkuljetuksen tehoajanmenekit ilmaistaan absoluuttisina arvoina (kuva 34), kuorman teko ja purku on koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä 20 minuuttia nopeampaa kuin metsurityönä tehdyn kaato-kasauksen jäljiltä. Laskelmassa tyhjänä ja kuormattuna-ajon sekä purkamisen ajanmenekit olivat molemmilla hakkuutavoilla samat. Koneellisen kaato-kasauksen jäljiltä pienpuun kuormaus on selvästi nopeampaa kuin metsurityön jäljiltä.

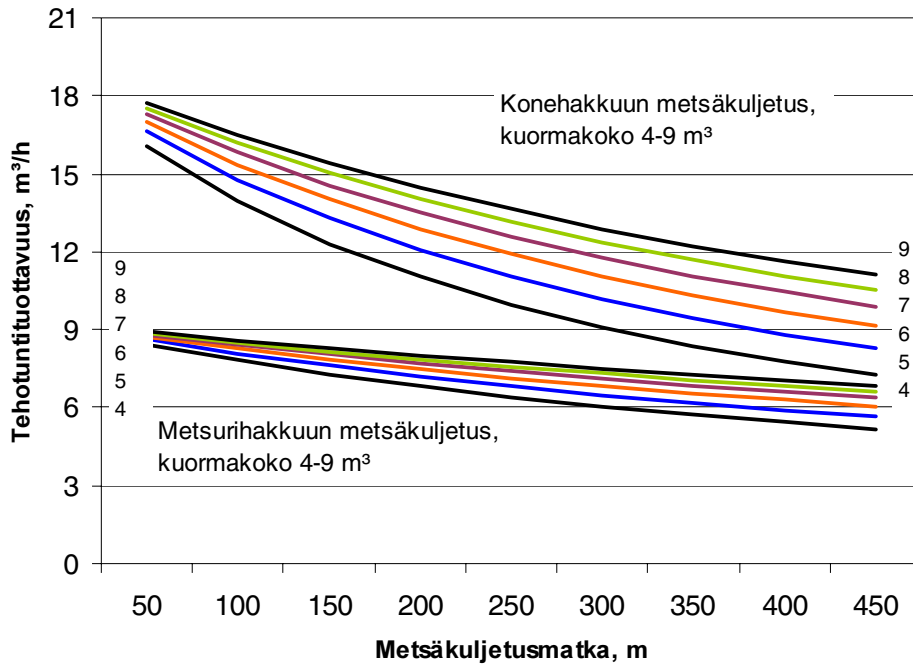


Kuva 33. Pienpuun metsäkuljetuksen työvaiheiden suhteelliset ajanmenekijakaumat, kun metsäkuljetusmatka on 250 m, kuormakoko 6 m³ ja pienpuukertymä 60 m³/ha.

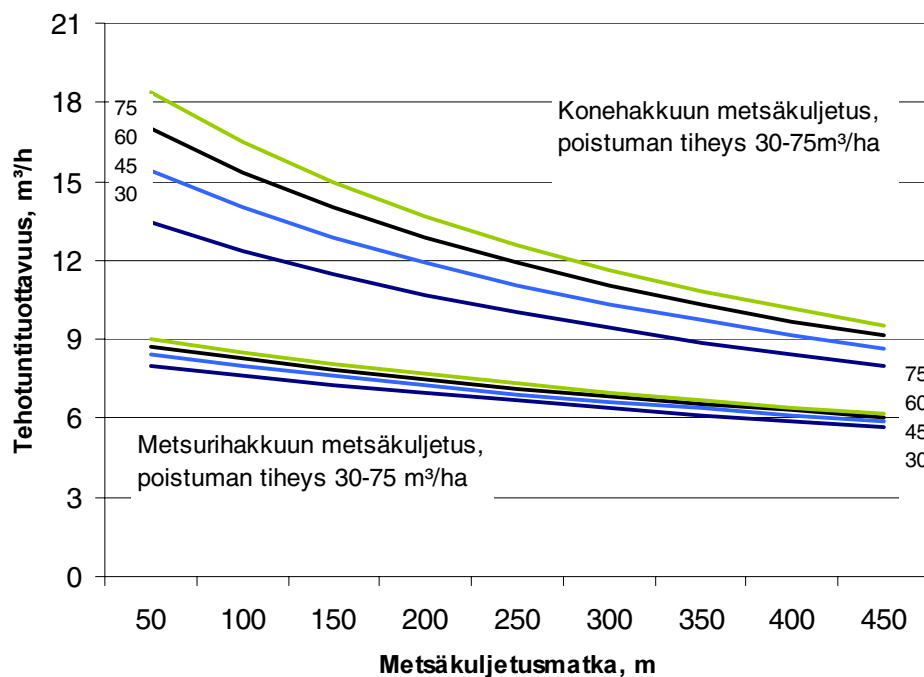


Kuva 34. Pienpuun metsäkuljetuksen työvaiheiden ajanmenekijakaumat, kun metsäkuljetusmatka on 250 m, kuormakoko 6 m³ ja pienpuukertymä 60 m³/ha.

Kuvissa 35 ja 36 on havainnollistettu kuormakoon ja metsäkuljetusmatkan sekä ajouravarsitiheyden ja metsäkuljetusmatkan vaikutusta pienpuun metsäkuljetuksen tuottavuuteen. Koneellisen kaadon jälkeisessä metsäkuljetuksessa kuormakoon kasvattaminen neljästä yhdeksään kiintokuution lisäsi tuottavuutta 50 metrin metsäkuljetusmatkalla 1,7 m³/tehotunnissa. Metsäkuljetusmatkan ollessa 450 metriä, kuormakoon kasvattaminen paransi tuottavuutta 3,9 m³/tehotunnissa. Vas-



Kuva 35. Pienpuun metsäkuljetuksen tuottavuus metsäkuljetusmatkan ja kuormakoon mukaan metsuri- ja konehakkueen jäljiltä. Hehtaarikohtainen poistuma 60 m³/ha.



Kuva 36. Pienpuun metsäkuljetuksen tuottavuus poistuman tiheyden ja metsäkuljetusmatkan mukaan metsuri- ja konehakkueen jäljiltä. Kuormakoko 6 m³.

taavasti metsurikaadon jäljiltä kuormakoon kasvattaminen nosti tuottavuutta 0,4 ja 1,7 m³/tehotunnissa (kuva 35). Pienpuun kertymä oli vakio, 60 m³ hehtaarilta.

50 metrin kuljetusmatkalla hehtaarikohtaisen kertymän kasvaminen 30:stä kiintokuutiosta 75:een kiintokuutioon hehtaarilta lisäsi metsäkuljetuksen tuottavuutta 5m³/tehotunnissa, kun pienpuu oli kaato-kasattu koneellisesti. 450 metrin kuljetusmatkalla ajouravarsitiheyden kasvu paransi tuottavuutta 1,5 (kuva 36). Kun pienpuut oli kaato-kasattu metsurityönä, pienpuukertymän kasvu 30:stä kiintokuutiosta 75:een kiintokuutioon hehtaarilta lisäsi tuottavuutta 50 metrin metsäkuljetusmatkalla 1 m³/tehotunnissa ja 450 metrin metsäkuljetusmatkalla 0,5 m³/tehotunnissa (kuva 36). Metsätraktorin kuormakoko oli vakio, 6 m³.

3.4 Energiapuukorjurin aikatutkimukset

Nuorten metsien energiapuun korjuussa voidaan käyttää myös yhdistelmäkoneita eli korjureita, jotka pystyvät tekemään sekä puiden kaato-kasauksen että metsäkuljetuksen (Lilleberg 1994, 1995). Korjureiden kilpailukyky perustuu energiapuun korjuukohteilla hakkuutyön suureen määrään suhteessa metsäkuljetukseen sekä siirtokustannusten pienuuteen verrattuna kahden koneen ketjuihin.

Tässä hankkeessa tutkittiin Moipu 400 E keräävää yhdistelmäkouraa, joka oli asennettu Valmet 840 kuormatraktoriin (kuva 37). Moipu 400 E perustuu saman valmistajan tekemään yhdistelmäkouraan (Moipu 400), joka on tarkoitettu ainespuun hakkuuseen ja kuormaukseen. Energiapuun-



Kuva 37. Yhdistelmäkoura 400 E & Valmet 840 kuormatraktori Posiolla (J. Laitila 2002).

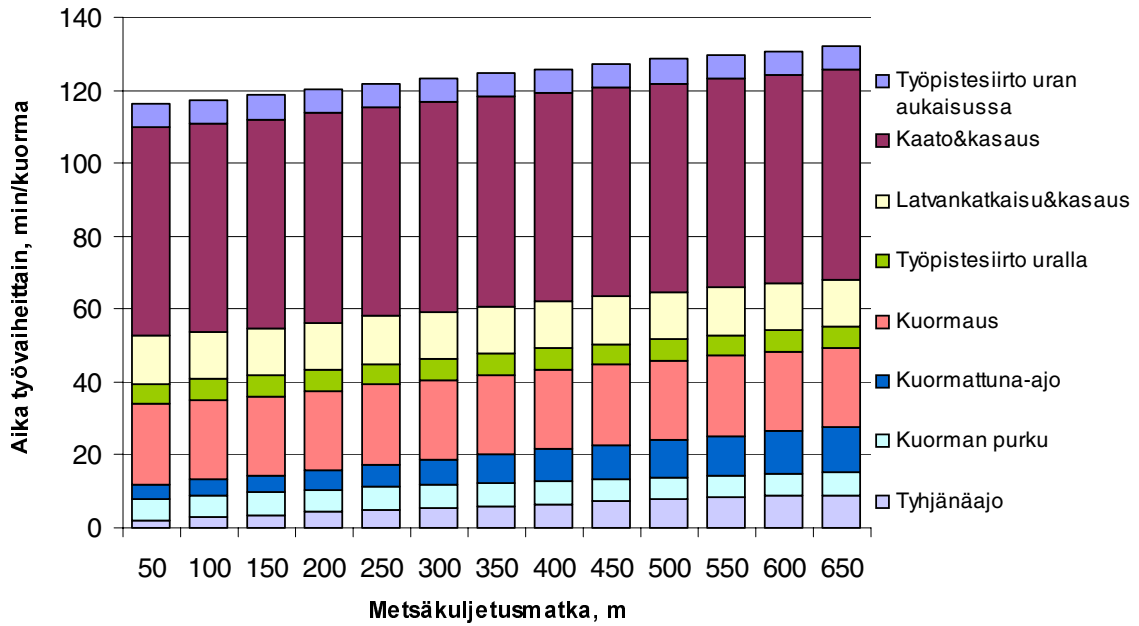
mallissa syöttörullat on poistettu ja ketjusahaan perustuva katkaisu on korvattu leikkaavalla terällä. Katkaistut puut kerätään Moipu 400 E:llä kouran leukojen väliin ja taakka kootaan liikuttamalla puunippua pystyasennossa poistettavalta puulta toiselle. Kouran tullessa täyteen puunippu lasketaan maahan ajouran varteen.

Korjuri-menetelmällä työskentely jakaantuu kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kone aukaisee ajouran. Kuormatraktorialustaisella Moipulla ura avattiin peruuttamalla. Työskentely tapahtui kuormatilän yli, jolloin etusermi oli kaadettu näkyvyyden parantamiseksi. Uraa avatessa kone ei kuormannut, vaan ajouralta poistetut puut kasattiin uran varteen.

Toisessa vaiheessa, kun ajoura oli aukaistu, korjuri harvensi ajourien väliset alueet. Harvennuk-sella pitkien puiden kuljetuspituuteen katkonta tapahtui kahdessa osassa. Ensiksi runko katkaistiin puolesta välistä poikki ja sen jälkeen tyveltä. Tiheiköissä latvat työnnettiin kouralla yhteen ja katkaistiin monta latvusta kerrallaan. Kourataakassa oli useimmiten 3–6 runkoa tai rungon osaa niiden koosta ja sijainnista riippuen. Välialueiden harvennuksen yhteydessä kone kuormasi kaatamansa puut. Kuorman tullessa täyteen kone vei kuorman tienvarsivarastolle ja palasi kuorman purkamisen jälkeen takaisin harvennuspaikalle. Puut pyrittiin kuljettamaan mahdollisimman pitkänä. Näin parannettiin hakkuutyön tuottavuutta ja lisättiin kuormakokoa.

Tutkimuskohteena oli nuorta koillismaalaista mänty-koivu-sekametsää, jolla metsänhoitotoimenpiteet olivat jääneet tekemättä. Työmaalla rungon keskikoko oli 31 dm³ (vaihtelu kuormien välillä 17–48 dm³), keskipituus 9,4 m (8–12 m) ja poistettujen runkojen määrä 2000 runkoa hehtaarilta (800–4500 runkoa/ha). Puustotunnukset määritettiin kantoläpimittojen perusteella ja ympyräkoelat olivat samankokoiset kuin kaato-kasaukseen aikatutkimuksissa. Puustotunnukset laskettiin kuormakohtaisina keskiarvoina. Aikatutkittuja kuormia oli 14 ja tehollinen työaika jaettiin aiemmin esiteltyihin työvaiheisiin.

Uran aukaisun, kaato-kasauksen, latvojen katkaisun ja kasauksen, työpistesiiirron, kuormauksen ja kuorman purkamisen ajanmenekistä laskettiin kuormien keskiarvot. Tyhjänä- ja kuormattuna-ajon ajat laskettiin metsäkuljetuksen ajanmenekkimalleilla 50–650 metrin metsäkuljetusmatkoille. Metsäkuljetusmatkan ollessa 50 metriä, kuorman tekoon, kuljetukseen ja purkuun kului aikaa keskimäärin 113 minuuttia ja 650 metrin kuljetusmatkalla 140 minuuttia (kuva 38). 50 metrin metsäkuljetusmatkalla hakkuun ja kuormauksen osuus oli 92 % ja kuljetuksen ja purkamisen 8 % tehotyöajasta. 650 metrin metsäkuljetusmatkalla hakkuun ja kuormauksen osuus oli supistunut 74 %:iin ja kuljetuksen ja purkamisen osuus oli kasvanut 26 %:iin tehotyöajasta.



Kuva 38. Energiapuukorjurin tehoajanmenekki työvaiheittain eri metsäkuljetusmatkoilla.

3.5 Pienpuun paalaus välivarastolla

Tutkimuksessa selvitettiin mahdollisuutta laajentaa hakkuutähdepaalainten käyttöaluetta pääte-hakkuiden hakkuutähteiden paalauksesta pienpuun paalaukseen tienvarsivarastoilla. Mikäli pienpuu olisi teknisesti mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa tiivistää samaan muotoon kuin hakkuutähteet, se tehostaisi ja virtaviivaistaisi puuenergian tuotantoa. Alkuvaiheessa paalaus tapahtuisi nykyisellä kalustolla tienvarsivarastoilla ja myöhemmin, jos menetelmä osoittautuisi kan-

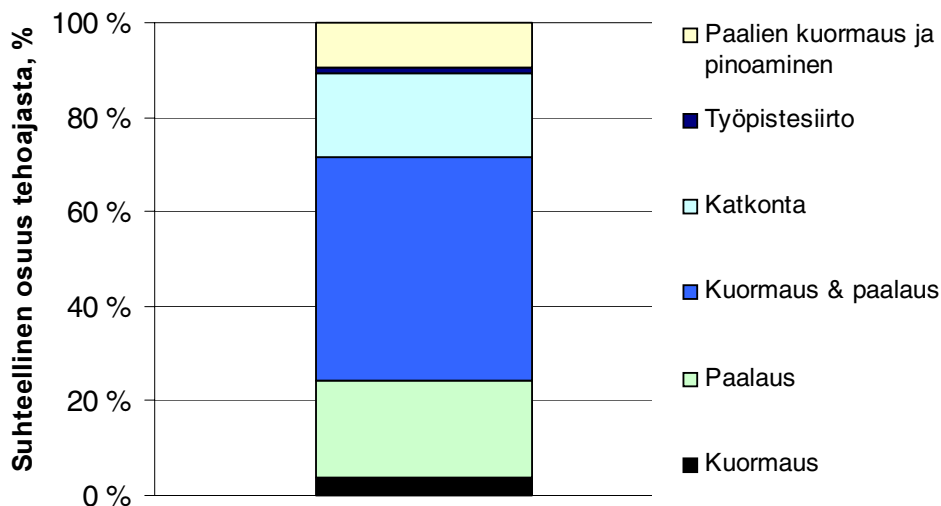


Kuva 39. Fiberpac 370 B paalaamassa pienkokopuuta Lestijärvellä (J. Laitila 2002).

nattavaksi, pienpuun tiivistys voitaisiin tehdä metsässä integroimalla paalauslaite osaksi kaato-kasauskonetta (Jylhä ym. 2003).

Pienpuun välivarastolla paalauksen aikatutkimuksissa koneen tehotyöaika jaettiin seuraaviin työvaiheisiin: kourataakan keräily ja kokopuun kuormaus syöttöpöydälle, paalaus, samanaikaisesti tapahtuva kokopuun kuormaus ja paalaus, paalien katkonta, työpistesiiro sekä valmiiden kokopuupaalien kuormaus ja pinoaminen. Tutkimustyömaalla paalaus tapahtui tieltä ja valmiit paalit pinottiin tien vastakkaiselle puolelle kuin missä alkuperäinen kokopuupino oli. Paalattu materiaali oli edellisenä kesänä kaadettua koivu-mänty-kokopuuta, jonka keskikosteus oli 40 % ja keskipituus 5–6 metriä. Aikatutkimuksissa käytetty hakkuutähdepaalain oli Timberjack 1210B:n alustalle asennettu Fiberpack 370 B ja koneen kuljettaja oli erittäin harjaantunut paalainkoneetyöhön. Tutkittuja kokopuupaaleja oli yhteensä 1010 ja paalien tuoremassa, kuivamassa ja kuivatuoretiheys määritettiin UPM:n Wisaforestin tehtailla.

Kokopuiden paalaus onnistui hyvin. Paalit olivat tiiviitä ja pysyivät hyvin kasassa. Ongelmaksi muodostuivat lähinnä paalien päät ja niihin jäävät lyhyet puunpätkät, jotka voivat pudota autokuljetuksen aikana tielle. Paalauksen tuottavuus oli 26,6 paalia tehotunnissa, eli suunnilleen samalla tasolla kuin hakkuutähdeiden paalauksessa. Välivarastolla paalauksessa tuottavuutta paransi työpistesiirojen pieni osuus ja kourataakkojen suuri koko. Paalien kuivapaino oli 310 kg ja materiaalin kuivatuoretiheys 493 kg/m³. Em. arvoilla laskien yhden kokopuupaalin kiintotilavuus oli 0,63 m³. Aikatutkimuksissa paalien keskipituus oli 3,14 metriä ja halkaisija 70 cm.



Kuva 40. Fiberpac 370 B paalaimen tehoajan jakautuminen työvaiheisiin kokopuun välivarastolla paalauksessa.

4 Korjuuketjujen kustannusrakenne

Pienpuun korjuukustannusten laskennassa käytettiin samoja koneiden ja ajoneuvojen tuntikustannus- ja kustannusrakennetietoja kuin aiemmassa ”Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavaisen hankinnan logistiikka” -projektissa (Asikainen ym. 2001). Tämä sen vuoksi, että voitiin verrata pienpuuhakkeen ja hakkuutähdehakkeen korjuun kustannuseroja mahdollisimman tarkasti. Hakkuutähdehankkeessa käytetyt tuntikustannustiedot ovat noin kaksi vuotta vanhoja, joten ne vastaavat vielä hyvin nykyistä kustannustilannetta.

Tuntikustannuksia laskettaessa kustannukset jaettiin pääomakustannuksiin, käyttökustannuksiin ja palkkakustannuksiin (Asikainen ym. 2001). Pääomakustannuksiin luettiin pääoman poistot ja korot. Käyttökustannukset muodostuivat pääasiassa polttoainekustannuksista, huolto- ja korjauskustannuksista sekä vakuutusmaksuista. Palkkakustannuksiin sisältyivät työntekijän palkat ja sivukustannukset sekä yrittäjän voitto. Kaukokuljetuskaluston ajotuntikustannusten ja kuormaus- ja purkukustannusten laskennassa 90 % polttoainekuluista jyvitettiin ajotuntikustannuksiin.

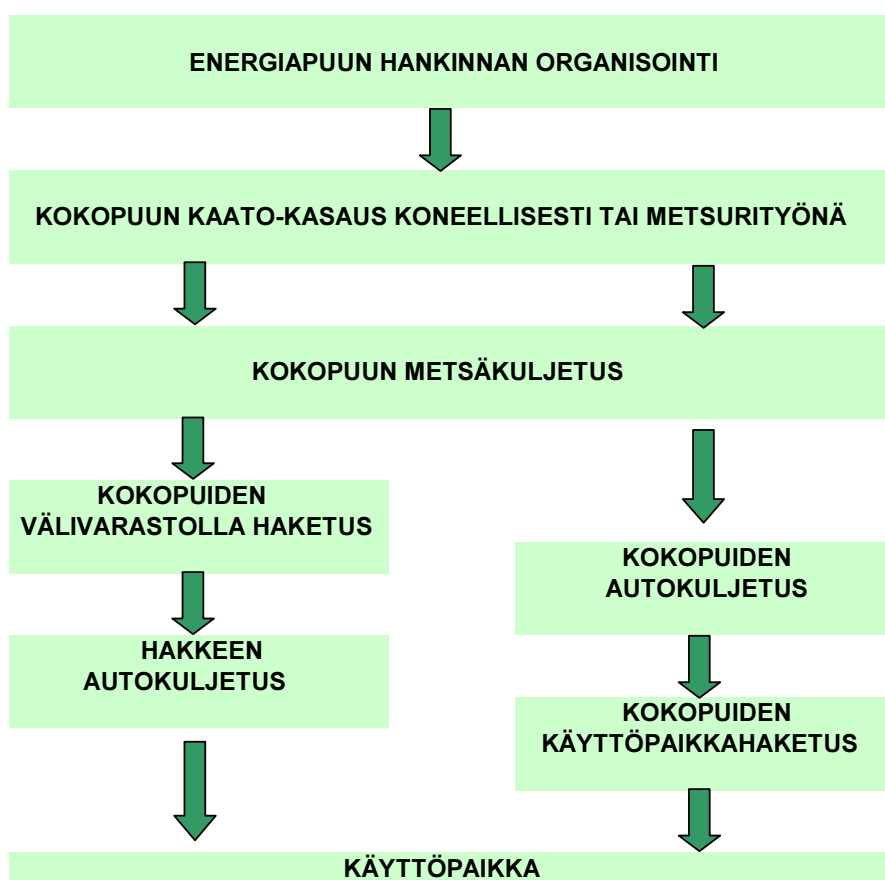
Kaato-kasauskoneen ja keskiraskaan metsätraktorin tuntikustannukset laskettiin erikseen. Laskentaperusteet olivat samat kuin aiemmassa hakkuutähdeprojektissa. Koneellisen kaato-kasauksen tuntikustannus oli 65 €/käyttötunti ja keskikokoisen/kevyen metsätraktorin 47 €/käyttötunti. Kaato-kasauskoneella pääomakulujen osuus oli 29 %, käyttökustannusten 42 % ja palkkakustannusten 29 % käyttötuntikustannuksesta. Metsätraktorilla pääomakulujen osuus oli 20 %, käyttökustannusten 42 % ja palkkakustannusten 38 % käyttötuntikustannuksesta. Koneiden vuotuinen käyttötuntimäärä oli 2800 tuntia ja pitoaika 15 000 tuntia.

Kaato-kasauskoneen arvonalisäveroton hankintahinta uutena oli 220 000 euroa ja metsätraktorin 175 000 euroa. Kaato-kasauskoneen alustakone oli ns. ”riisuttu versio” hakkuukoneesta, eli siinä ei ollut esim. mitta- ja tiedonsiirtolaitteita, joita ei välttämättä tarvita energiapuun hakkuussa. Metsurityönä tehtävän kaato-kasauksen kustannukset perustuvat voimassa olevaan työehtosopimukseen (Metsäalan palkkaus 2003). Siirtelykaadon työkohtaiseen palkkaan lisättiin sivukustannukset, moottorisahan osuus, korvaus ajourien suunnittelusta sekä matkakorvaukset. Korjuuketjujen tuntikustannus ja kustannusrakennetiedot on koottu taulukkoon 2.

Pienpuuhakkeen käyttöpaikkahinnan kustannusrakenne selvitettiin välivarastohaketukseen ja kokopuiden käyttöpaikkahaketukseen perustuvilla ketjuilla (kuva 41) työvaiheittain ja kustannuslajeittain. Pienpuun kaato-kasaus tapahtui joko koneellisesti tai metsurityönä. Kokopuiden kaukokuljetuksessa auton kuormakoko oli joko 30 m³ tai 20 m³. Laskelma perustui esimerkkileimikkoon, jonka metsäkuljetusmatka oli 200 metriä ja energiapuukertymä oli 50 m³/ha. Poistettavien runkojen keskikoko oli 30 dm³. Korjattavasta energiapuusta männyn osuus oli 29 %, kuusen 10 % ja lehtipuiden 61 %. Kaukokuljetusmatka oli 40 kilometriä. Välivarastolla haketuksen kustannus oli 5,3 €/m³ ja käyttöpaikalla haketuksessa kustannus oli 1,8 €/m³. Energiapuun hankinnan yleiskustannuksiksi eli lähinnä organisaatiokuluiksi oletettiin 2 €/m³, mikä on 0,7 €/m³ enemmän

Taulukko 2. Koneiden tuntikustannukset sekä pääoma-, käyttö- ja palkkakustannusten suhteelliset osuudet tuntikustannuksista. Metsurityössä on huomioitu kalleusluokan vaikutus päiväkustannukseen, €/päivä. Kaukokuljetuskalustolla kustannukset jaoteltiin ajotuntikustannuksiin sekä kuorma- ja purkukustannuksiin.

	Tuntikustannus	Pääomakust, %	Käyttökust, %	Palkkakust, %
Kaato-kasauskone	65 €/h	29	42	29
Metsuri	153 tai 156 €/pvä	-	-	100
Ajokone	47 €/h	20	42	38
Hakkuri	122 €/h	30	51	19
Hakeauto	76 tai 53 €/h	19 tai 27	54 tai 34	27 tai 38
Kokopuuauto	75 tai 52 €/h	20 tai 29	53 tai 33	27 tai 39

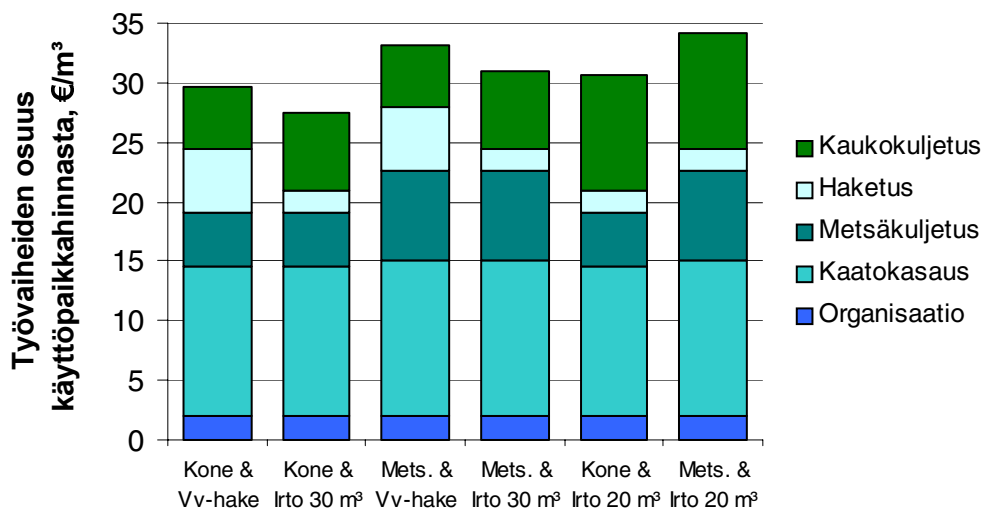


Kuva 41. Pienpuuhakkeen toimitusketjujen eri työvaiheet.

kuin hakkuutähdeprojektissa käytetty kustannus. Tämä sen vuoksi, että pienpuu ei ole niin selvästi ainespuun hankinnan sivutuote kuin hakkuutähde ja kannot ovat. Korjuuketjujen (kuva 41) käyttöpaikkahinnan tarkemmat laskentaperusteet on esitetty liitteessä 1.

Esimerkkityömaalla kallein työvaihe oli kaato-kasaus, jonka osuus käyttöpaikkahinnasta oli n. 13 €/m³. Erot miestyönä tai koneella tehdyn kaatokasauksen kustannusten välillä ovat pienet, mutta kun huomioidaan metsäkuljetuksen tehostuminen koneellisen kaadon jäljiltä, on koneellinen kor-

juu miestyötä edullisempaa. Pienpuuhakkeen tuotantokustannukset käyttöpaikalle toimitettuna oli menetelmästä riippuen 28–34 €/m³ (kuva 42). Koneelliseen kaato-kasaukseen ja kokopuiden käyttöpaikkahakemukseen perustuvalla menetelmällä pienpuuhakkeen tuotantokustannukset olivat alimmat, kun kaukokuljetuksen kuormakoko oli 30 m³. Välivarastohakemukseen perustuva menetelmä oli edullisin tuotantomenetelmä, jos kokopuuauton kuormakoko jäi 20 kiintokuutiometriin.



Kuva 42. Työvaiheiden osuudet käyttöpaikkahinnasta eri menetelmillä.

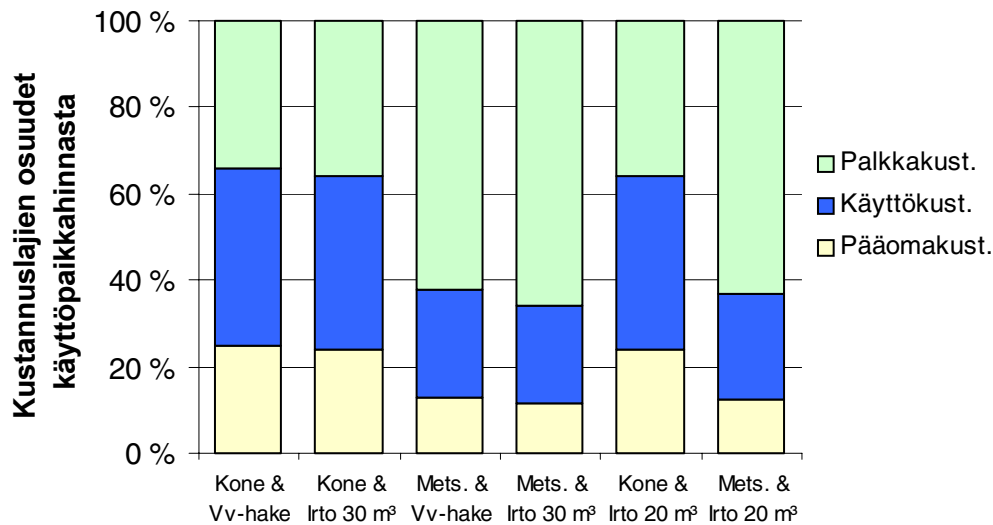
Kaukokuljetuksessa kuormakoolla on suurempi merkitys tuottavuuteen ja kustannuksiin kuin metsäkuljetuksessa, sillä kaukokuljetuksessa kokonaisajasta suhteellisesti suurempi osa kuluu varsinaisessa kuljetuksessa (Korpilahti 1996). Karsimattomalla puutavaralla kuorman tiiviys jää niin pieneksi, että kuljetusyksikköjen kantavuutta ei voida hyödyntää täysimääräisesti. Laskelmassa käytetty kokopuuauton vaihtoehtoinen 20 m³ kuormakoko perustuu Metsätehon 70-luvulla tekemään ”Kokopuuraaka-aineen autokuljetus” -tutkimukseen (Peltola 1976). Tuolloin ajoneuvoyhdistelmän kokonaispituus oli 17,86 metriä. Nykyiset säännökset mahdollistavat ajoneuvoyhdistelmälle 25,25 metrin pituuden (Korpilahti 1996). Kuormatilan pituuden lisäys helpottaa silmämääräisesti katkottujen kokopuiden kuormausta ja purkua sekä mahdollistaa aiempaa suuremmat kuormakoot. Laskelmassa käytetty 30 m³ kuormakoko perustuu osin oletukseen, että ajoneuvoyhdistelmän kokonaispituuden ja kuormatilan kasvu mahdollistaisi kolmen nipun kuormat ja kokopuunippujen keskipituus olisi 6 metriä. Kuorman tiiviys riippuu kuljetettavan materiaalin pituuden ohella oksikkuudesta ja puuston järeydestä, joten kokopuu kuormien välinen vaihtelu on suurta.

Välivarastolla haketus edustaa vakiintunutta korjuuteknologiaa ja tällä hetkellä lähes kaikki pienille ja keskisuurille voimalaitoksille toimitettu kokopuu hake on tuotettu tällä menetelmällä. Käyttöpaikalla haketus on suurten voimalaitosten haketusmenetelmä. Yhteen paikkaan keskitetty haketus mahdollistaa suuret vuosituotokset ja siten myös edullisemmat kustannukset kuin siirrettävillä laitteilla. Käyttöpaikalla haketuksessa päästään eroon ns. kuumasta ketjusta, jolloin tuotantoketjun kukin työvaihe voidaan tehdä niin tehokkaasti kuin kalustolla on mahdollista, ilman

turhia odotusaikoja. Keskitettyyn haketukseen sopivia laitetyppejä ovat hidaskäyntinen murskain sekä keskinopea ja nopea hakkuri tai murskain (Rinne 1998).

Hidaskäyntisillä murskaimilla kokopuun haketuksessa ongelmaksi on muodostunut materiaalin huono murskautuvuus, jos rungot on purettu pitkittäin syöttöpöydälle ja etenkin jos materiaali on tuoretta. Rungot pyrkivät menemään ”vitaksena” murskaimen telojen läpi, murskaimen tuottavuus laskee ja murskeeseen tulee pitkiä tikkuja, jotka saattavat aiheuttaa tukoksia kuljettimilla ja holvaantumista siiloissa. Poikittain purettaessa tätä ongelmaa ei ole, mutta tällöin rungot eivät saa olla pidempiä kuin mitä syöttöpöydän leveys on. Kokopuiden määrämittaan katkonta hidastaa kaato-kasauksen tuottavuutta noin 2 m³/tehotunnissa mutta voi lisätä jonkin verran kaukokuljetuksen tuottavuutta.

Kustannuslajittaisessa tarkastelussa suurimmat erot olivat metsuri- tai koneelliseen kaato-kasaukseen perustuvien hankintaketjujen välillä. Metsurikaadon ketjuilla palkkakustannusten osuus käyttöpaikkahinnasta oli noin 60 % kun konekaadon ketjuilla palkkakulujen osuus oli noin 35 %. Pienpuun koneelliseen kaatoon perustuvilla hakkeen tuotantoketjuilla kustannusrakenne oli hyvin samantyyppinen kuin hakkuutähdehakkeen tuotantoketjuilla.



Kuva 43. Pienpuuhakkeen käyttöpaikkahinnan kustannusrakenne eri menetelmillä.

5 Toimintaolosuhteiden vaikutus korjuukustannuksiin

5.1 Korjuukustannusten laskentaperusteet

Pienpuun korjuukustannukset laskettiin seitsemälle maan eri osissa sijaitsevalle käyttöpaikalle. Laskenta-aineistona oli VMI 8 ja 9:n puusto- ja kertymätiedot, metsäyhtiöiden kuntakohtaiset leimikkotiedot sekä pienpuun korjuun työvaiheiden tuottavuus ja kustannusfunktiot. Kaukokuljetusmatkat käyttöpaikalle laskettiin kuntakohtaisina keskiarvoina ko. kunnan ainespuuleimikoiden sijaintitietojen perusteella. Leimikoiden paikkatietotarkastelu tehtiin karttaohjelmalla ja kuljetusmatkat laskettiin 100 km säteellä tieverkkoa pitkin.

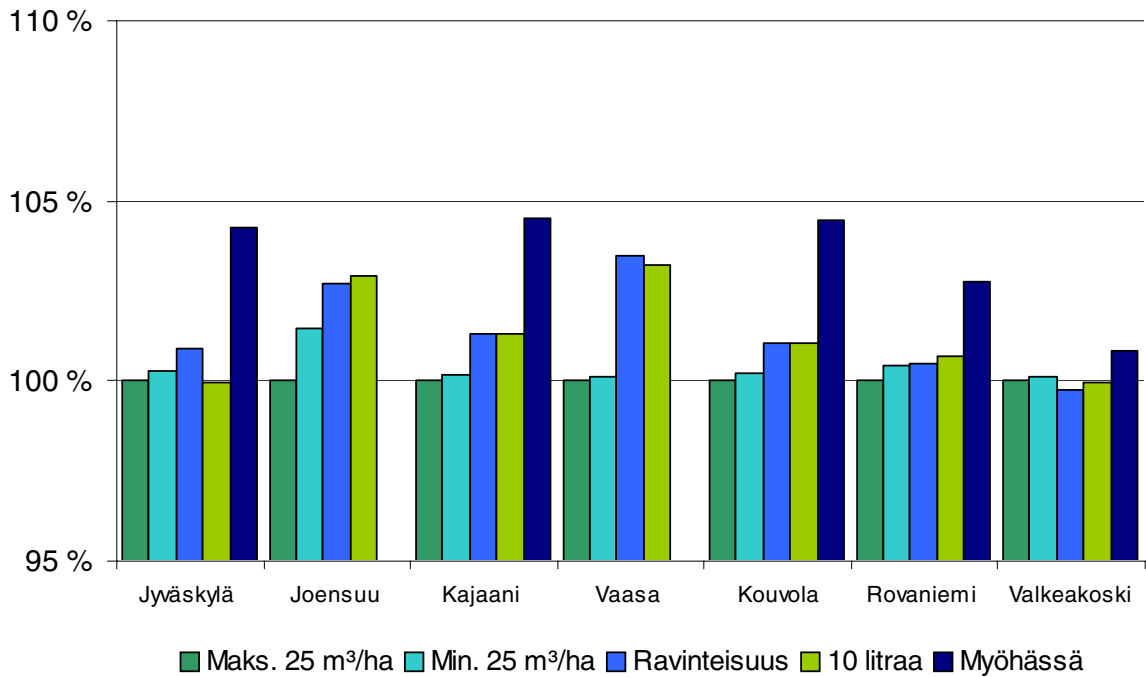
Korjuukustannukset laskettiin välivarastohaketukseen ja kokopuiden käyttöpaikkahaketukseen perustuvilla ketjuilla ja pienpuun kaato-kasaus tapahtui joko koneellisesti tai metsurityönä. Samalla tarkasteltiin kertymärajoitteiden vaikutusta korjuukustannuksiin ja eroja käyttöpaikkahintoissa maan eri osissa.

Kustannukset laskettiin hankinta-alueen kuntiin jokaiselle VMI-koealalle/laskentakuviolle ja järjesteltiin taulukkolaskentaohjelmassa hankintakustannusten mukaan pienimmästä suurimpaan. Tuloksissa ilmoitettu keskihinta oli pienpuun kumulatiivisen kertymän määrällä ja hinnalla painotettu keskihinta.

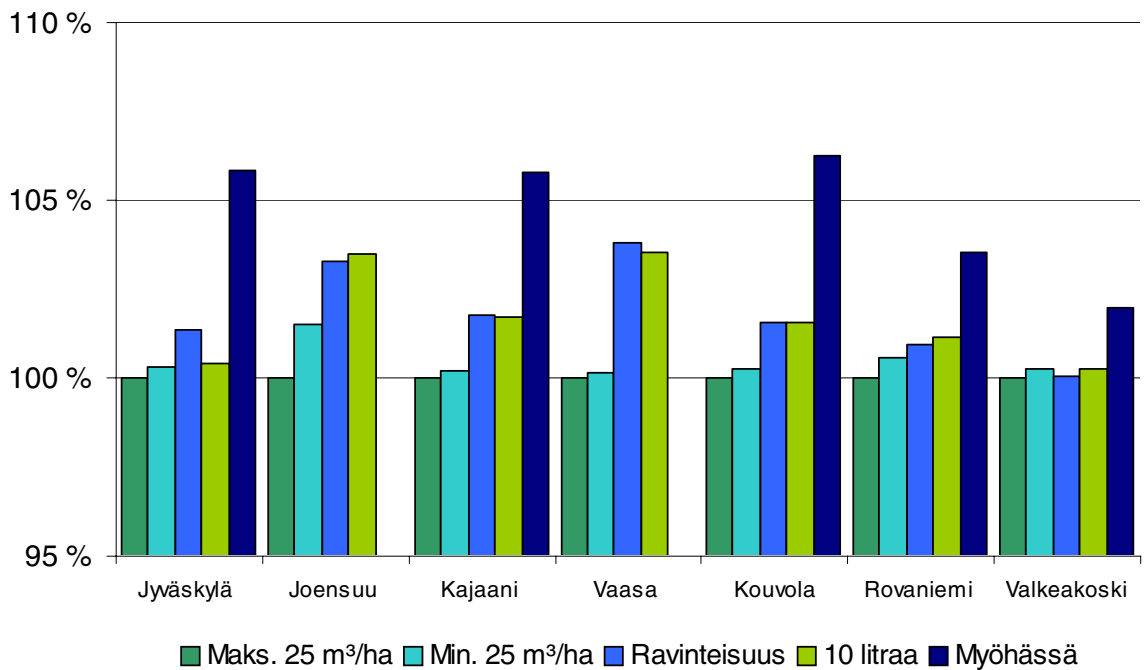
5.2 Kertymärajoitteiden vaikutus käyttöpaikkahintaan

Kertymärajoitteiden vaikutusta käyttöpaikkahintaan tarkasteltiin toimitusketjuittain maan eri osissa (kuvat 44–47). Vuotuiseksi hankintamääräksi oletettiin 90 000 m³ kokopuuhaketta ja käyttöpaikkahinnat ko. hankintamäärällä laskettiin kokopuuhakkeen energiasisällön mukaan (Hakkila 1978, Nurmi 1993 ja 2000). Rajoitteiden vaikutus käyttöpaikkahintaan ilmaistiin suhteellisina arvoina. Kertymärajoitteella, ainespuuta enintään 25 m³/ha, käyttöpaikkahinta oli 100 %. Laskennassa hakkeen kosteudeksi oletettiin 38 % ja hakekiintokuutiometrin lämpöarvo määräytyi puulajisuhteiden mukaan. Kertymärajoitteet lisäsivät koivun suhteellista osuutta kokonaiskertymästä (kuvat 4–10), mikä puolestaan lisäsi hakekuutiometrin energiasisältöä. Korjuuketjujen työvaiheittaiset tuottavuudet ja korjuukustannukset perustuivat tässä raportissa esitettyihin ajanmenekki-funktioihin sekä tuntikustannus- ja tuottavuustietoihin. Kokopuun autokuljetuksen kuormakoko oli 30 m³. Tarkemmat laskentaperusteet on esitelty liitteessä 1.

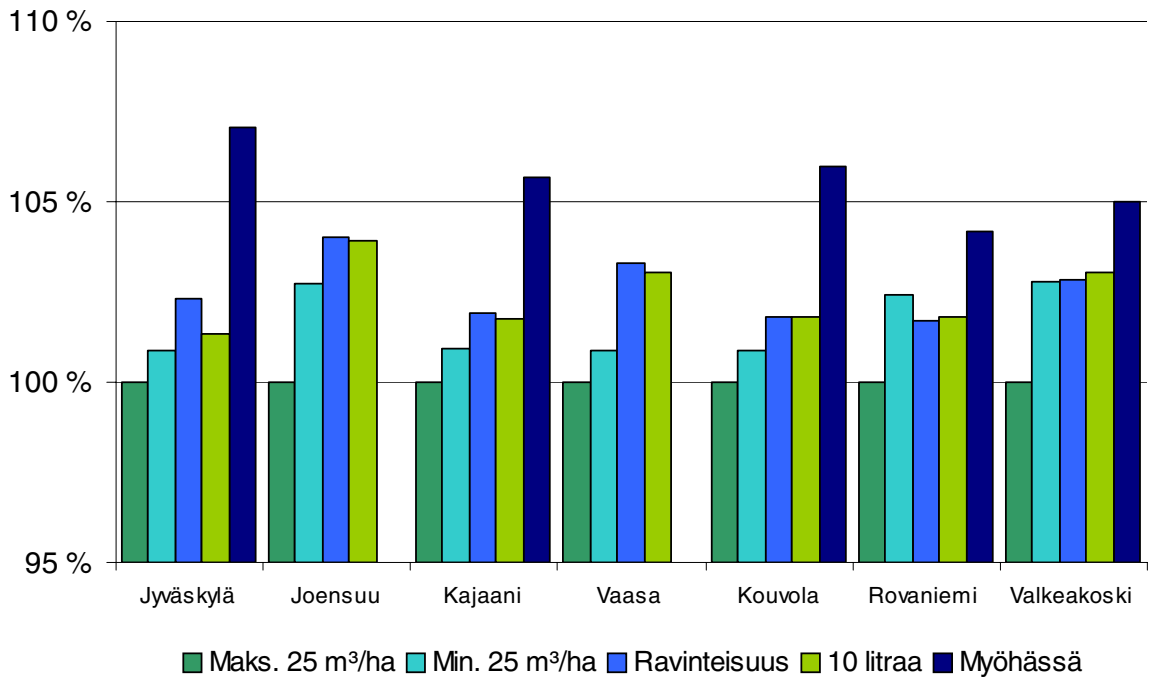
Kertymärajoitteet nostivat pienpuuhakkeen käyttöpaikkahintaa maksimissaan 6–7 %. Käyttöpaikkahaketukseen perustuvilla korjuuketjuilla rajoitteet nostivat käyttöpaikkahintaa pienemmästä kaukokuljetuksen kuormakoosta johtuen hieman enemmän kuin välivarastolla haketukseen perustuvalla ketjulla. Alueilla, joilla pienpuun hankintamäärä oli raaka-ainevaroihin nähden huo-



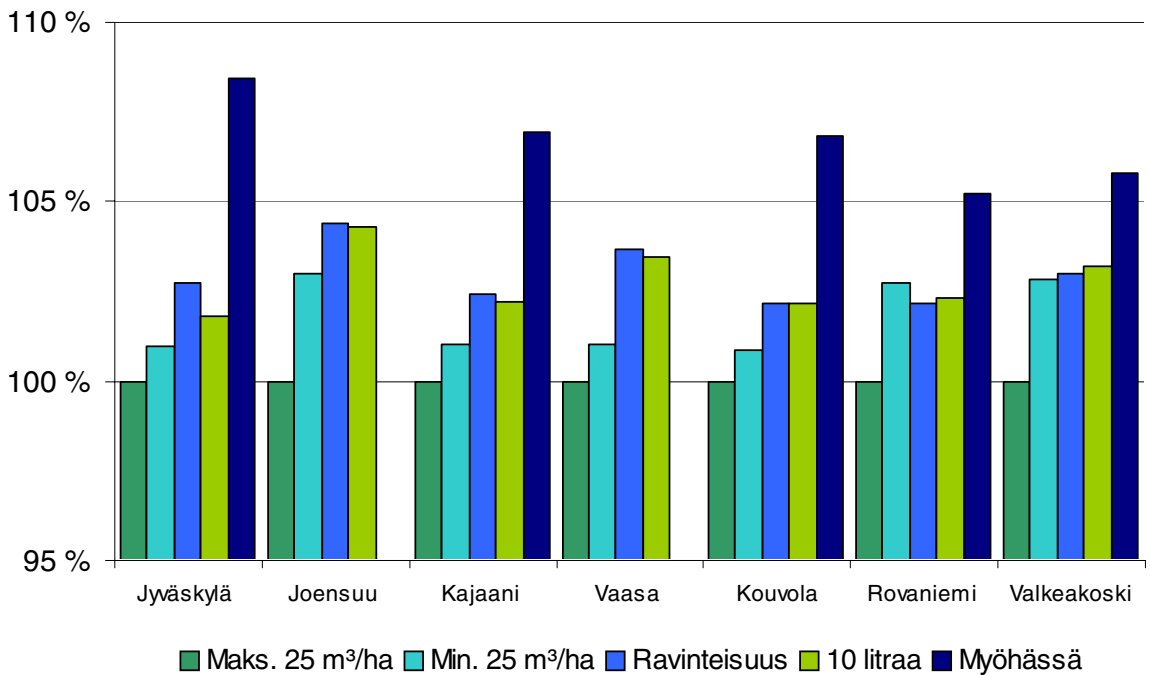
Kuva 44. Rajoitteiden vaikutus pienpuuhakkeen käyttöpaikkahintaan, kun vuotuinen hankintamäärä on 90 000 m³. Kokopuun koneellinen kaato-kasaus ja välivarastolla haketus.



Kuva 45. Rajoitteiden vaikutus pienpuuhakkeen käyttöpaikkahintaan, kun vuotuinen hankintamäärä on 90 000 m³. Kokopuun koneellinen kaato-kasaus ja käyttöpaikalla haketus.



Kuva 46. Rajoitteiden vaikutus pienpuuhakkeen käyttöpaikkahintaan, kun vuotuinen hankintamäärä on 90 000 m³. Kokopuun kaato-kasaus metsuriryönä ja välivarastolla haketus.



Kuva 47. Rajoitteiden vaikutus pienpuuhakkeen käyttöpaikkahintaan, kun vuotuinen hankintamäärä on 90 000 m³. Kokopuun kaato-kasaus metsuriryönä ja käyttöpaikalla haketus.

mattava, rajoitteiden vaikutus keskihintaan oli suurempi kuin alueilla, joilla hankintamäärä on selvästi alle kertymäpotentiaalin. Kertymän pienentyessä ja hankintamäärän pysyessä samana, korjuu joudutaan ulottamaan entistä epäedullisimmille kohteille ja laajemmalle alueelle, mikä nostaa korjuukustannuksia.

Vaasan ja Joensuun ympäristössä ns. hoitorästikohteilta kertyvä pienpuumäärä oli pienempi kuin vuotuiseksi hankintatavoitteeksi asetettu 90 000 m³. Em. alueilla kaikki hoitorästikohteet, kalleimmasta halvimpaan, tulisivat korjuun piiriin. Kuvissa 44–47 suhteellinen käyttöpaikkahintapylväs on poistettu, jos kertymä on jäänyt alle vuotuisen hankintamäärän.

5.3 Erot käyttöpaikkahinnoissa maan eri osissa

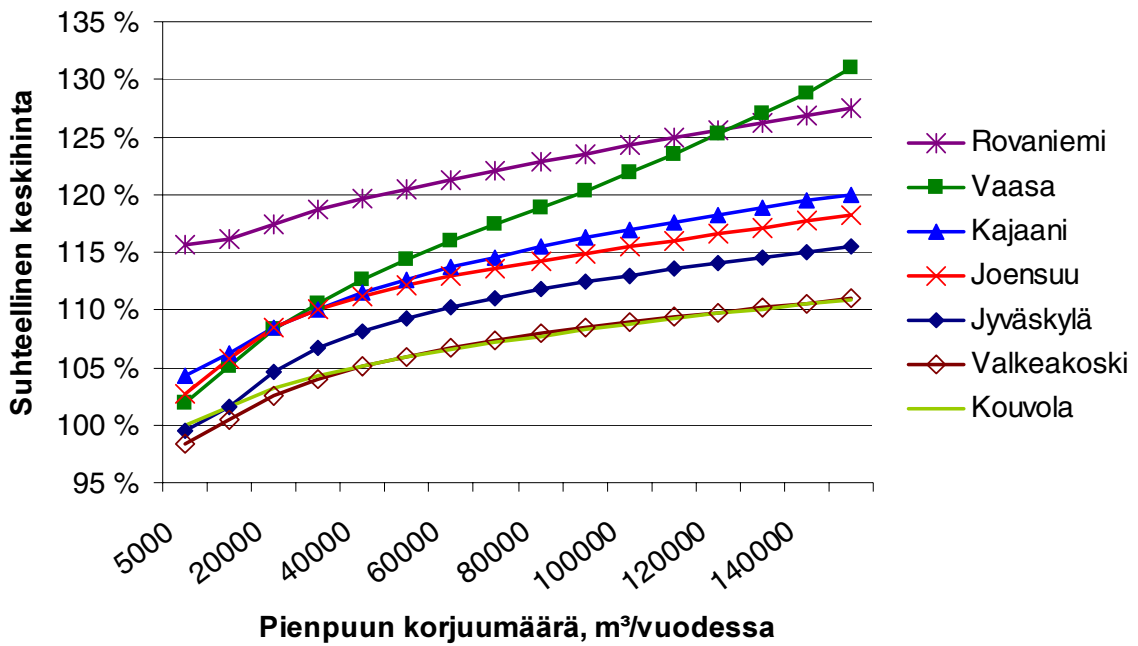
Käyttöpaikkahintoja vertailtiin välivarastohaketukseen ja kokopuiden käyttöpaikkahaketukseen perustuvilla ketjuilla maan eri osissa hankintamäärän mukaan (kuvat 48–52). Kokopuun autokuljetuksen kuormakoko oli 30 m³, ja koneiden käyttötuntikustannukset pysyivät vakioina pienpuuhakkeen eri hankintamäärillä. Metsurihakkuussa huomioitiin kalleusluokan vaikutus kaato-kasauksen kustannuksiin (Rovaniemi). Pienpuuhakkeen keskihinnat käyttöpaikalla ilmaistiin suhteellisina lukuina. Kouvolan käyttöpaikalla suhdeluku oli 100 %, kun vuotuinen hankintamäärä oli 5000 m³. Rajoitteena oli, että ainespuun kertymä korjuukohteella sai olla enintään 25 m³/ha ja kokopuukertymä piti olla vähintään 25 m³/ha.

Pienpuun korjuumäärien kasvu nosti käyttöpaikkahintaa. Hankintamäärien kasvaessa korjuu oli ulotettava entistä epäedullisemmille kohteille ja laajemmalle alueelle. Kokopuuhakkeen käyttöpaikkahintaan vaikutti eniten pienpuun saatavuus suhteessa vuotuisen korjuumäärään sekä hankinta-alueen muoto. Pienpuun korjuussa kallein työvaihe oli kaato-kasaus. Kaato-kasauksen kustannuksiin eniten vaikuttava tekijä oli rungon koko, joka pieneni etelästä pohjoiseen päin mentäessä.

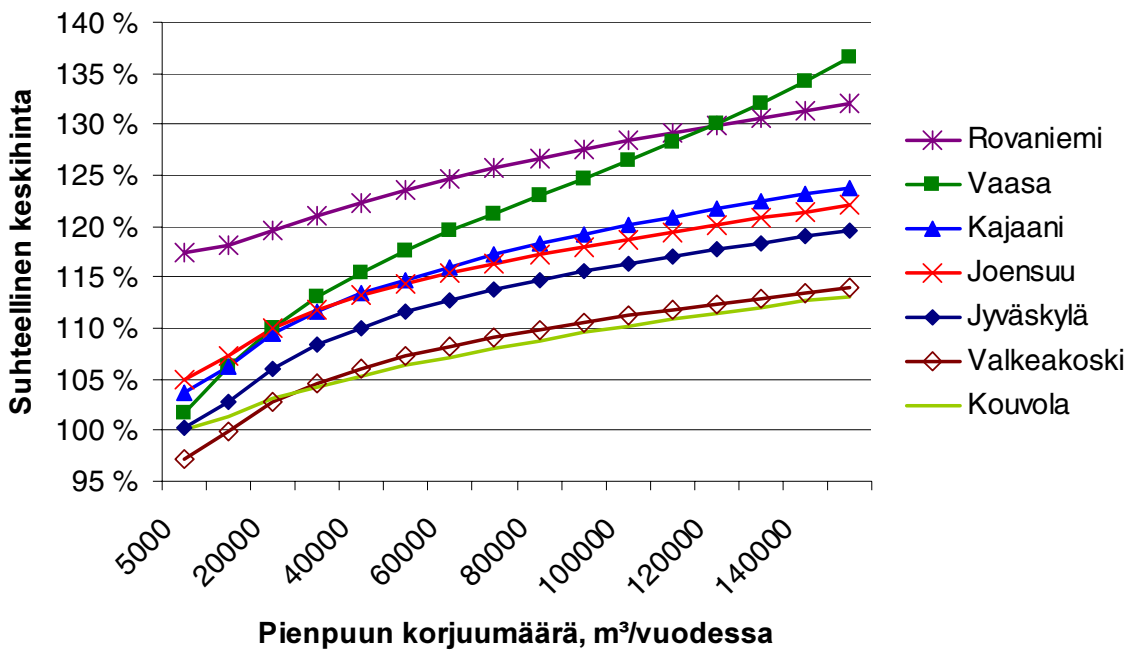
Verrattaessa maan eri osia keskenään Valkeakoskella ja Kouvolassa oli halvimmat käyttöpaikkahinnat (kuvat 48–54). Seuraavaksi edullisimmat alueet olivat Jyväskylä, Joensuu ja Kajaani. Rovaniemellä ja Vaasassa olivat korkeimmat käyttöpaikkahinnat. Vuotuisen hankintamäärän ollessa 90 000 m³, ero halvimman ja kalleimman käyttöpaikan välillä oli noin 15 %.

Vaasassa, missä hankinta-alue oli puolipyörän muotoinen, korjuumäärän lisäys 5000:sta 150 000:een kiintokuutiometriin nosti käyttöpaikkahintaa jyrkästi. Hankintamäärän kasvu vaikutti eniten käyttöpaikalla haketetun kokopuun käyttöpaikkahintaan ja vähiten välivarastolla haketetun kokopuun käyttöpaikkahintaan. Käyttöpaikkahaketusketjulla korjuumäärän lisäys 5000:sta 150 000:een kiintokuutiometriin nosti käyttöpaikkahintaa 25–35 %.

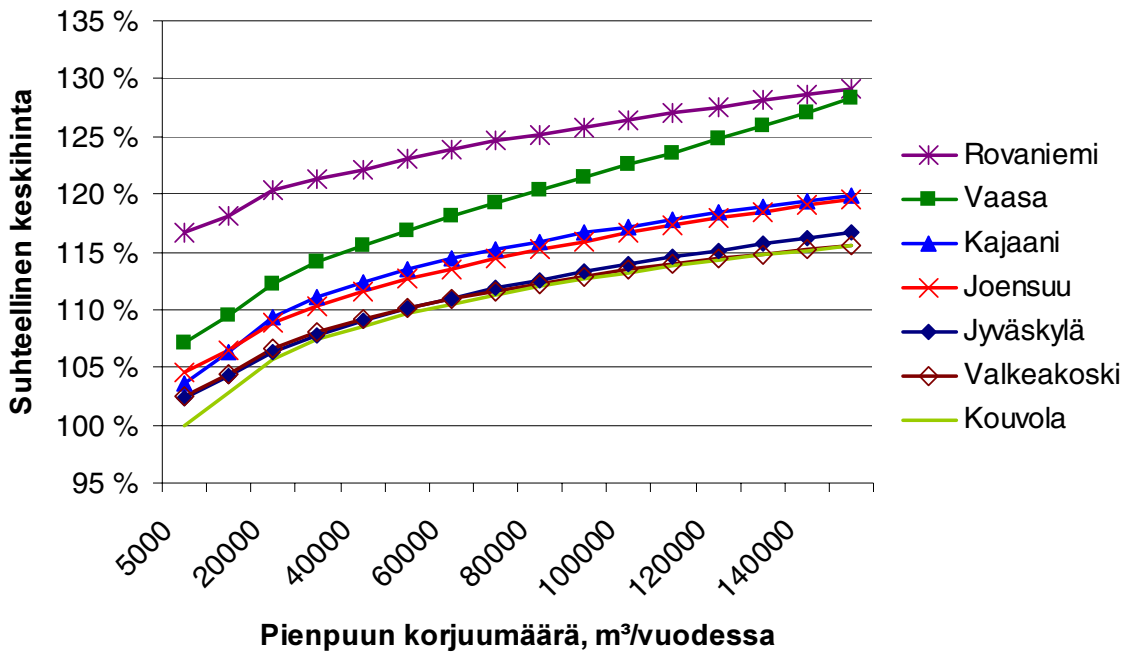
Välivarastohaketusketjulla, jolla kaukokuljetuksen kuormakoko on kokopuu-autoa suurempi, hankintamäärän kasvu nosti käyttöpaikkahintaa 21–29 %.



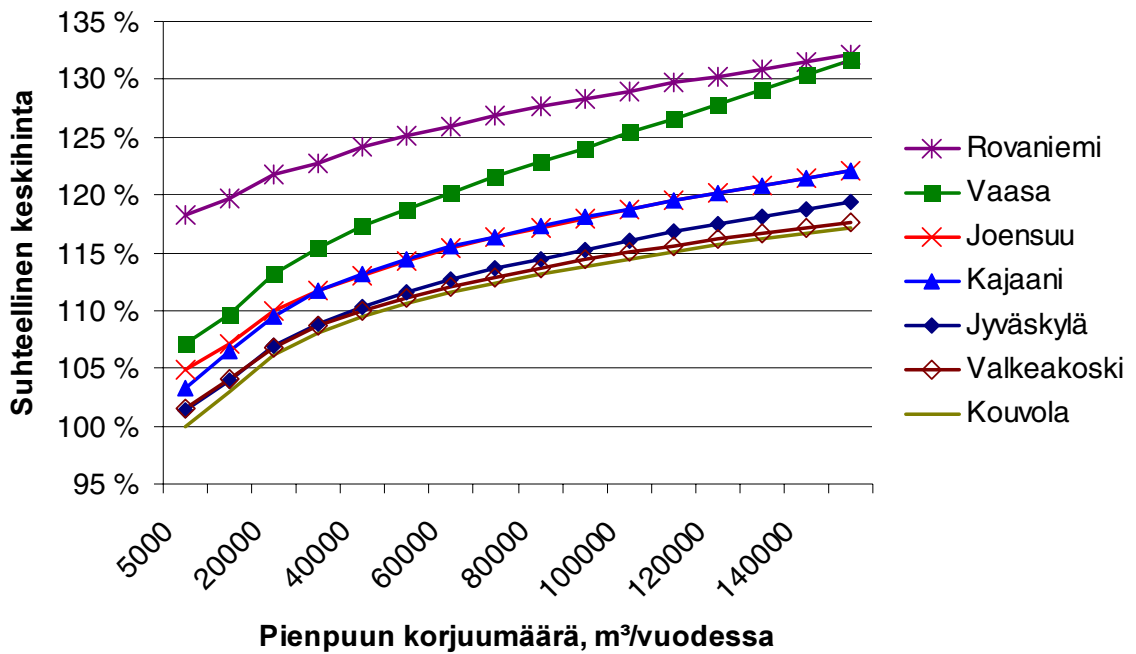
Kuva 48. Suhteelliset käyttöpaikkahinnat maan eri osissa kokopuun koneelliseen kaato-kasaukseen ja välivarastohaketukseen perustuvalla ketjulla.



Kuva 49. Suhteelliset käyttöpaikkahinnat maan eri osissa kokopuun koneelliseen kaato-kasaukseen ja käyttöpaikkahaketukseen perustuvalla ketjulla.



Kuva 50. Suhteelliset käyttöpaikkahinnat maan eri osissa, kun kokopuun kaato-kasaus tehdään metsuri-työnä ja haketus tapahtuu välivarastolla.



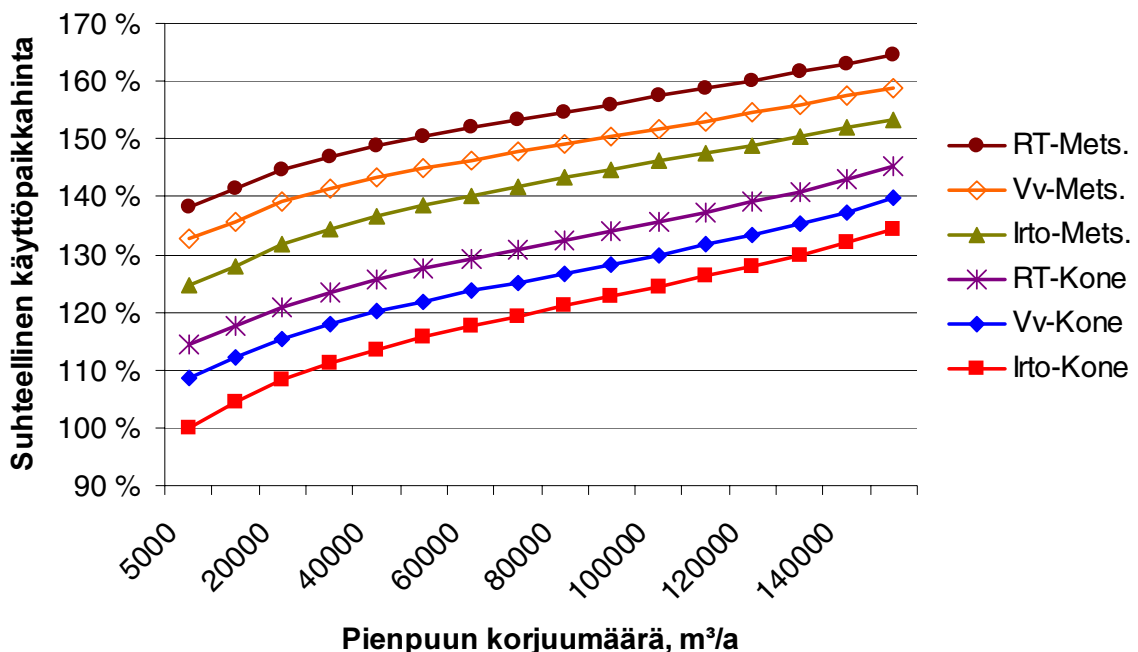
Kuva 51. Suhteelliset käyttöpaikkahinnat maan eri osissa, kun kokopuun kaato-kasaus tehdään metsuri-työnä ja haketus tapahtuu käyttöpaikalla.

5.4 Pienpuuhakkeen toimitusketjujen vertailu

Pienpuuhakkeen toimitusketjuja vertailtiin Vaasan ja Jyväskylän ympäristössä. Vertailussa olivat mukana pienpuun koneelliseen tai manuaalinen kaatokasaukseen perustuvat ketjut, joissa hakeutus tapahtui joko välivarastolla tai pienpuu kuljetettiin kokopuuna tai paalattuna käyttöpaikalla hakettavaksi. Välivarastolla paalauksessa paalaus kustannus oli 3,5 €/kokopuupaali. Kaukokuljetuksen kuormakoko oli 66 risutukkaa eli 41,6 m³. Muutoin koneketjujen työvaiheittaiset tuottavuudet ja korjuukustannukset perustuivat tässä raportissa esitettyihin ajanmenekifunktioihin sekä tuntikustannus- ja tuottavuustietoihin (liite 1). Kokopuun autokuljetuksen kuormakoko oli 30 m³.

Koneiden käyttötuntikustannukset pysyivät vakiona eivätkä muuttuneet korjattavan pienpuumäärän mukaan. Keskihinnat käyttöpaikalla ilmaistiin suhteellisina lukuina. Koneelliseen kaatokasaukseen ja kokopuiden käyttöpaikalla hakettukseen perustuvalla ketjulla keskihinta käyttöpaikalla oli 100 %, kun vuotuinen hankintamäärä oli 5000 m³. Kertymärajoitteena oli, että ainespuun kertymä korjuukohteella sai olla enintään 25 m³/ha ja kokopuukertymä piti olla vähintään 25 m³/ha.

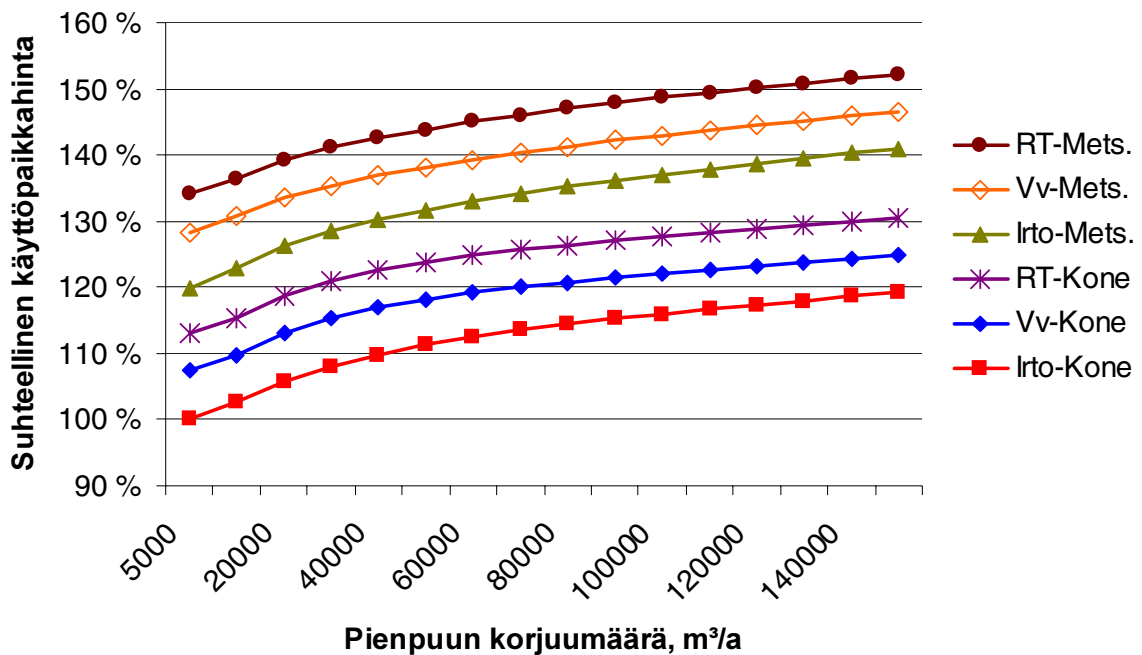
Laskelman perusteella pienpuun koneelliseen kaatokasaukseen perustuva korjuuketju oli edullisempi korjuumenetelmä kuin metsurihakuuseen perustuva korjuuketju. Kokopuiden käyttöpaikkahakettukseen perustuva korjuumenetelmä oli edullisin sekä Vaasan (kuva 52) että Jyväskylän (kuva 53) ympäristössä. Hankinta-alueen muodosta ja pienemmästä energiapuukertymästä johtuen käyttöpaikkahinnat nousivat hankintamäärän kasvaessa Vaasan seudulla jyrkemmin kuin Jyväskylän ympäristössä.



Kuva 52. Pienpuuhakkeen toimitusketjujen vertailu hankintamäärän funktiona Vaasan ympäristössä.

Välivarastohaketukseen perustuva korjuumenetelmä oli toiseksi edullisin pienpuuhakkeen tuotantomenetelmä (kuvat 52 ja 53). Erot eri toimitusketjujen välillä ovat vielä melko pienet ja esim. kokopuun kaukokuljetuksen kuormakoon pieneneminen muutamalla kiintokuutiometrillä tai käyttöpaikkahaketus-kustannusten nousu tasoittaisi kokopuun käyttöpaikka- tai välivarastohaketukseen perustuvien menetelmien välistä kustannuseroa tuntuvasti.

Pienpuun välivarastolla paalaukseen perustuva menetelmä oli kallein vertailussa mukana olleista menetelmistä. Välivarastolla paalauksen kustannukset olivat selvästi suuremmat kuin kuormakoon kasvusta ja käyttöpaikalla haketukselta saatavat kustannussäästöt. Paalausmenetelmä voisi olla kilpailukykyinen vain jos paalauslaitte olisi osa kaato-kasauskonetta. Kokopuun puristaminen risutukin muotoon jo metsässä, ilman että kaato-kasauksen tuottavuus merkittävästi alenisi, parantaisi metsäkuljetuksen tuottavuutta, helpottaisi mittausta sekä tehostaisi metsäpolttoaineiden tuotannon ja kuljetusten ohjausta.



Kuva 53. Pienpuuhakkeen toimitusketjujen vertailu hankintamäärän funktiona Jyväskylän ympäristössä.

6 Pienpuuhakkeen tukien ja hakkuutähdevirtojen integroinnin vaikutus käyttöpaikkahintaan

Metsäpolttoaineiden hankintaa suunniteltaessa tarvitaan tietoa, minkä verran mitään metsäpolttoainelajia, hakkuutähde, kannot ja pienpuu, on kannattavasti korjattavissa hankinta-alueelta. Tietoja alueellisista energiapuuvaroista ja korjuukustannuksista tarvitaan sekä strategisen, taktisen että operatiivisen tason suunnitteluun.

Tutkimuksessa tarkasteltiin hakkuutähteen ja pienpuun korjuumääriä ja käyttöpaikkahintoja Vaasassa ja Jyväskylässä sijaitsevilla käyttöpaikoilla lämpöarvon mukaan (Hakkila 1978, Nurmi 1993 ja 2000). Hakkuutähdehakkeen osalta kertymä ja korjuukustannustiedot perustuivat ”Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta” -projektin laskelmiin (Asikainen ym. 2001). Hakkuutähde korjattiin risutukkimenetelmällä (3,4 €/risutukki) ja hakkuutähteen saatavuuslaskenta perustui kolmen metsäyhtiön vuonna 2000 tekemien päätehakkuiden leimikotietoihin. Laskennassa hakkuutähteen kosteudeksi oletettiin 50 %, ja hakekiintokuutiometrin lämpöarvo määräytyi puulajisuhteiden mukaan (Hakkila 1978, Nurmi 1993 ja 2000).

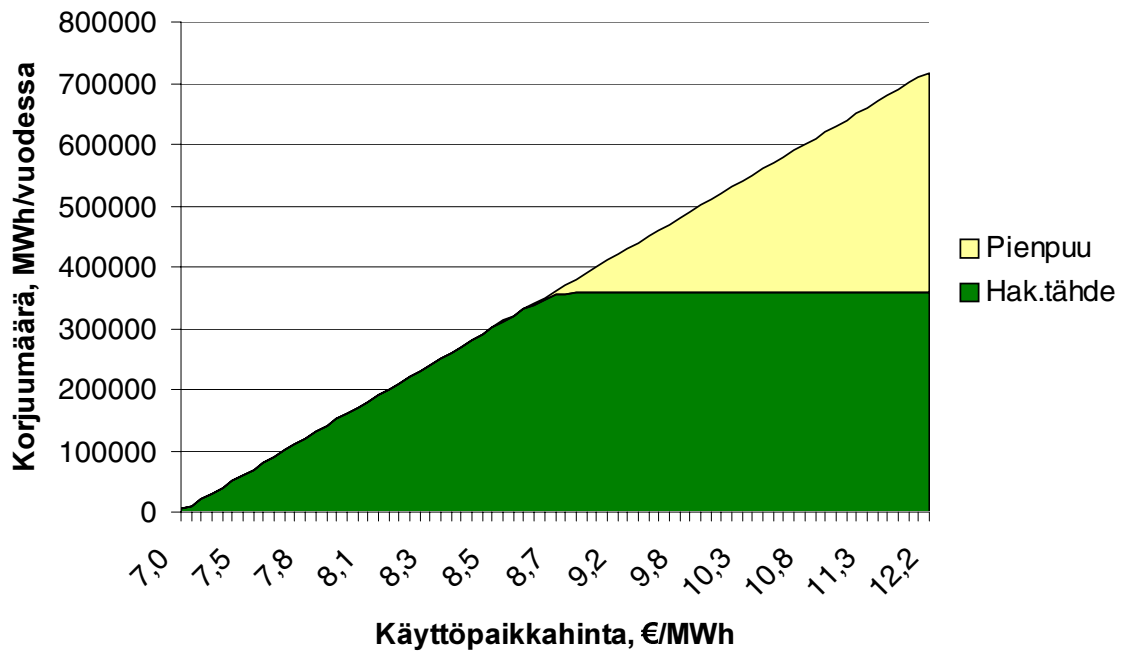
Pienpuulla korjuuketju perustui koneelliseen kaato-kasaukseen ja välivarastolla haketukseen. Korjuukohteen kertymärajoitteena oli, että ainespuun kertymä sai olla enintään 25 m³/ha ja kokopuukertymä piti olla vähintään 25 m³/ha. Hakkeen kosteus oli 38 % ja lämpöarvo määräytyi puulajisuhteiden mukaan. Laskelmassa tarkasteltiin pienpuuhakkeen hintakilpailukykyä verrattuna hakkuutähdehakkeeseen ilman tukia ja ns. Kemera-tuilla. Nuorten metsien energiapuun korjuulle maksettavan tuen suuruus oli 11,48 €/m³ (www.metsavastaa.fi 2004). Laskelmassa oletettiin, että kaikki pienpuun korjuukohteet olivat tukikelpoisia.

Käyttöpaikkahinnat ja kertymät järjesteltiin taulukkolaskentaohjelmassa hankintakustannusten mukaan pienimmästä suurimpaan. Tuloksissa ilmoitettu käyttöpaikkahinta oli metsäpolttoaineiden kumulatiivisen kertymän määrällä ja hinnalla painotettu keskihinta. Vuotuinen hankintataavoite Vaasan ja Jyväskylän ympäristössä oli 400 000 MWh metsäenergiaa.

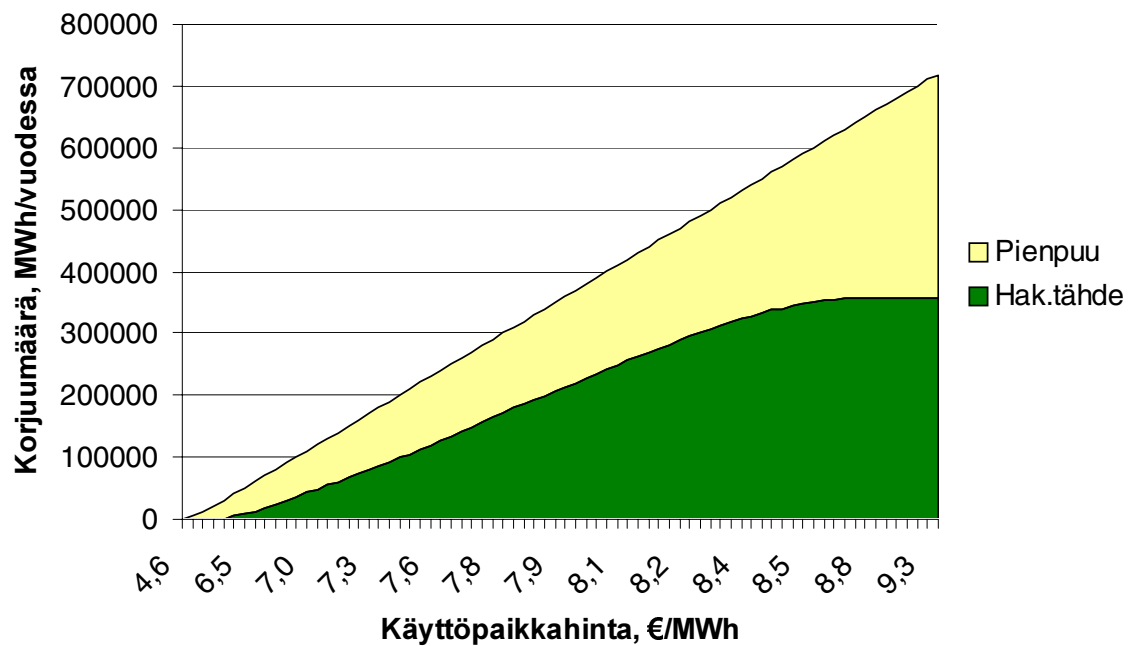
Vaasan ympäristössä metsäpolttoaineiden käyttöpaikkahinta oli 9,0 €/MWh, kun pienpuun Kemera-tuet eivät olleet mukana laskelmassa. Hakkuutähteen osuus vuotuisesta hankintamäärästä oli 360 000 MWh ja pienpuun 40 000 MWh. Ilman Kemera-tukea oli kannattavinta ensiksi korjata kaikki alueen päätehakkuita kertyvä hakkuutähde ja vasta sen jälkeen siirtyä pienpuun korjuukohteille (kuva 54).

Vaasan ympäristössä metsäpolttoaineiden käyttöpaikkahinta oli 8,1 €/MWh, kun nuortenmetsien energiapuun korjuulle maksettavat tuet oli huomioitu. 400 000 MWh:n vuotuisella korjuumäärällä hakkuutähteen osuus oli 240 000 MWh ja pienpuun 160 000 MWh (kuva 55).

Jyväskylän ympäristössä metsäpolttoaineiden käyttöpaikkahinta oli 7,9 €/MWh, kun pienpuun

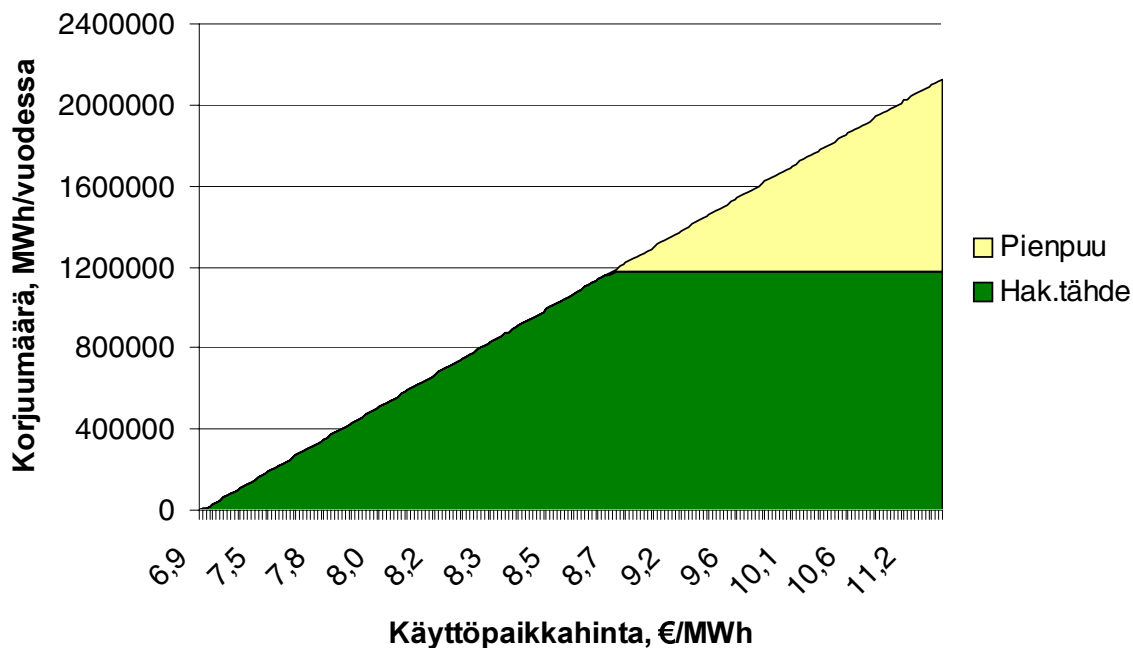


Kuva 54. Pienpuun ja hakkuutähteen korjuumäärät ja käyttöpaikkahinta Vaasassa, kun pienpuulle ei makseta energiapuun korjuun Kemera-tukea.

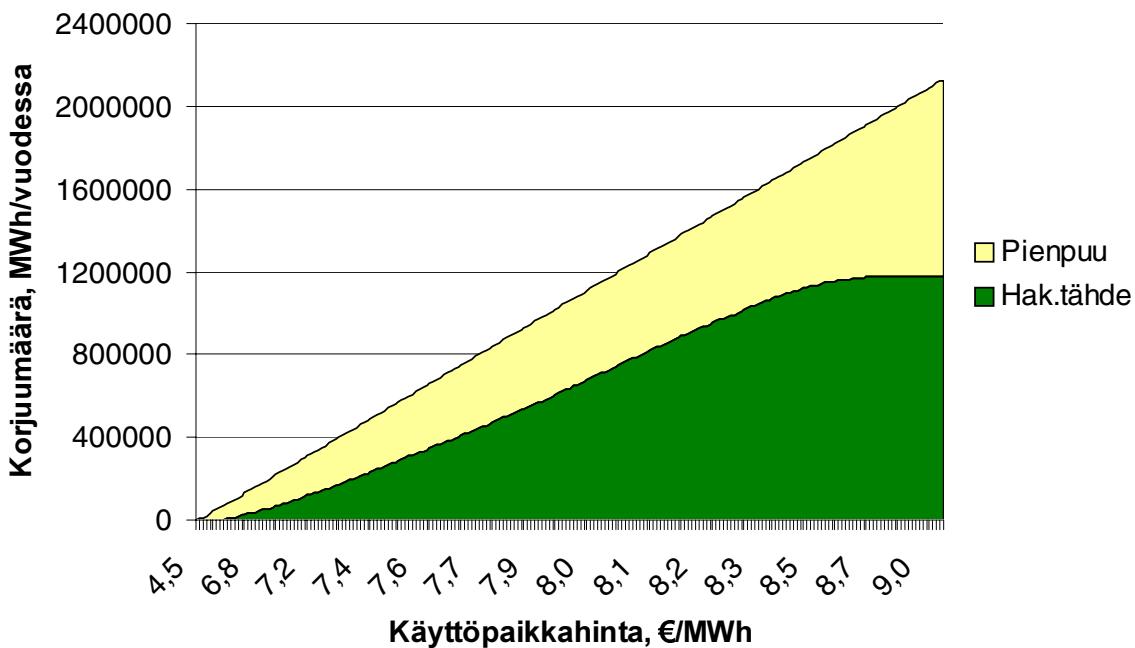


Kuva 55. Pienpuun ja hakkuutähteen korjuumäärät ja käyttöpaikkahinta Vaasassa, kun pienpuulle maksettava Kemera-tuki on otettu huomioon.

Kemera-tuet eivät olleet mukana laskelmassa. Hakkuutähteen osuus vuotuisesta hankintamäärästä oli 400 000 MWh. Ilman Kemera-tukea oli kannattavinta tuottaa kaikki metsäenergia päätehakkuilta korjattavalla hakkuutähteellä (kuva 56).



Kuva 56. Pienpuun ja hakkuutähteen korjuumäärät ja käyttöpaikkahinta *Jyväskylässä*, kun pienpuulle ei makseta energiapuun korjuun Kemera-tukea.



Kuva 57. Pienpuun ja hakkuutähteen korjuumäärät ja käyttöpaikkahinta *Jyväskylässä*, kun pienpuulle maksettava Kemera-tuki on otettu huomioon.

Jyväskylän ympäristössä metsäpolttoaineiden käyttöpaikkahinta oli 7,3 €/MWh, kun nuortenmetsien energiapuun korjuulle maksettavat tuet oli huomioitu. 400 000 MWh:n vuotuisella korjuumäärällä hakkuutähteen osuus oli 171 000 MWh ja pienpuun 229 000 MWh (kuva 57).

7 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Pienpuun saatavuudessa on merkittäviä eroja maan eri osissa. Kertymät pienenevät etelästä pohjoiseen päin mentäessä. Pienpuumääriä arvioitiin tässä tutkimuksessa valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) koealatiетоjen pohjalta. Tutkimustulosten suora soveltaminen operatiiviseen suunnitteluun on kuitenkin vaikeaa, koska suunnitteen mukaisten energiapuumäärien ja toteutuvien hakkuiden välillä voi olla huomattavia eroja. Toimenpide-ehdotukset tehdään kahdelle 5-vuotisjaksolle, eivätkä ne sido millään tavalla metsänomistajia. Toimenpiteiden toteuttamisasteiden asettaminen on harkinnanvaraista, mitä voi pitää menetelmän heikkoutena. Tässä tutkimuksessa toteutumisasteeksi asetettiin 100 %. Käytännössä on kuitenkin ylioptimistista olettaa, että kaikki korjuukelpoiset kohteet tulevat markkinoille ja energiapuu saadaan talteen. Toimenpiteiden toteutumisastetta eri alueilla voi arvioida mm. metsäkeskusten vuosikertomuksista, joissa on mm. esitetty nuorten metsien kunnostustarve ja toteutuneet työmäärät metsäkeskuksen alueella.

Toteutumisasteen vaikutusta pienpuun käyttöpaikkahintaan voi arvioida esimerkiksi niin, että 70 000 m³ vuotuisella hankintamäärällä ja 70 %:n toteutumisasteella käyttöpaikkahinta on likimain sama kuin käyttöpaikkahinta 100 000 m³:n hankintamäärällä ja 100 %:n toteutumisasteella. Toteutumisasteen ohella kertymiin ja korjuukustannuksiin vaikuttavat leimikon valintakriteerit, joita tässä tutkimuksessa tarkasteltiin viidellä eri tasolla. Leimikon valintakriteerien, talteensaantoprosenttien ja toteutumisasteiden avulla voi arvioida teoreettisesti, teknisesti sekä käytännössä hyödynnettävissä olevan pienpuun korjuumääriä ja kustannuksia. Vaihtoehtoisten metsikön käsittelyvaihtoehtojen ja hakkuuskenaarioiden tarkasteluun on kehitetty MELA-ohjelmisto ja energiapuulaskelmia varten Energia-MELA (Mielikäinen ym. 1995, Malinen ja Pesonen 1996, Keskimölä ja Malinen 1997). Teknisten ja taloudellisten rajoitteiden vaikutusta energiapuukertymiin on mahdollista tarkastella myös metsäsuunnitelmatietojen avulla (Pasanen ym. 1997).

Laskentamenetelmässä monistettiin sama nuortenmetsien rakenne kaikkiin Metsäkeskuksen kuntiin. Kuntakohtaisia tietoja tarkennettiin monilähdeinventointiaineiston avulla ottamalla huomioon kehitysluokkajakauma kunnan alueella. Paikalliset olosuhteet voivat kuitenkin olla suuralueen keskiarvosta poikkeavia esimerkiksi puulajisuhteet ja kasvupaikat voivat vaihdella alueen sisällä, mikä vähentää tulosten luotettavuutta kuntatasolla. Systemaattiseen otantaan ja tarkkoihin maastomittauksiin perustuva VMI antaa kuitenkin luotettavia tuloksia suuralueelle.

VMI on 1990-luvun alusta lähtien tuottanut satelliittikuvatulkinnan avulla jatkuvia metsävarakarttoja. Näitä käyttävät esimerkiksi metsäyhtiöt hakkuukohteiden etsintään. Kokemukset metsävarakarttojen käytettävyydestä uudistushakkuukohteiden paikantamiseen ovat olleet hyviä. Sen sijaan taimikonhoito- ja harvennuskohteiden paikantamisesta ei ole kokemusta.

Kokopuuhakkeen käyttöpaikkahintaan vaikutti eniten pienpuun saatavuus, käyttömäärä ja hankinta-alueen muoto. Leimikon valinnan kriteerit vaikuttivat vain vähän käyttöpaikkahintaan, jos hankintamäärä oli selvästi alle kertymäpotentiaalin. Kertymälaskelmissa käytetyt rajoitteet vai-

kuttivat energiapuukertymän ohella puulajisuhteisiin. Kasvupaikan viljavuudelle asetetut minimirajoitteet vähensivät männyn osuutta ja lisäsivät koivun ja muiden lehtipuiden osuutta kokonauskertymästä. Koivun suhteellisen osuuden lisääntyminen paransi hakekuutiometrin lämpöarvoa, mikä kompensoi kohonneita hakkeen hankintakustannuksia etenkin maan pohjoisosissa. Käyttöpaikkahintoja tarkasteltaessa ero kalleimman ja halvimmän alueen välillä oli noin 15 %.

Pienpuun korjuussa kallein työvaihe oli kaato-kasaus. Kaato-kasauksen kustannuksiin eniten vaikuttava tekijä oli rungon koko, joka pieneni etelästä pohjoiseen päin mentäessä. Erot miestyönä tai koneella tehdyn pienpuun kaato-kasauksen kustannusten välillä ovat pienet, mutta kun huomioidaan metsäkuljetuksen tehostuminen koneellisen kaadon jäljiltä, on koneellinen korjuu miestyötä edullisempaa. Metsäkuljetuksen osalta kustannuksia nosti Vaasan alueella pitkät lähikuljetusmatkat ja Rovaniemellä muuta maata alempi pienpuun hehtaarikohtainen kertymä.

Koneelliseen kaato-kasaukseen ja kokopuun käyttöpaikkahaketukseen perustuva korjuuketju oli menetelmävertailussa edullisin kokopuuhakkeen tuotantomenetelmä. Menetelmän laajempaa käyttöönottoa kuitenkin karsivat vastaanottopään rajoitukset, sillä vuoden 2003 lopussa vasta viidellä suurella voimalaitoksella oli oma käyttöpaikkamurskain (Hakkila 2004) ja niistäkin suurin osa oli hidaskäyntisiä murskaimia. Tästä syystä välivarastohaketusetju, joka soveltuu sekä pienten että suurten voimalaitosten haketusmenetelmäksi ja jonka kaukokuljetuskapasiteetti on suuri, lielee myös tulevaisuudessa valtamenetelmä kokopuuhakkeen tuotannossa.

Pienpuulle maksettavat ns. Kemera-tuet parantavat pienpuuhakkeen kilpailukykyä hakkuutähdehakkeeseen verrattuna. Ilman tukia pienpuu ei pärjää hintavertailussa hakkuutähdehakkeen kanssa. Pienpuuhakkeen ero hakkuutähdehakkeen kustannuksiin syntyy kaato-kasausvaiheessa, joka maksaa 12–15 €/m³. Siksi toiminnan tehostaminen tulisi kohdistua juuri tähän vaiheeseen. Muiden kustannustekijöiden osalta pienpuuhake on kilpailukykyistä hakkuutähdeeseen verrattuna.

Timberjack 720:n (aiempi tuotenimi EnHar) tuottavuudet olivat likimain samalla tasolla kuin aiemmissa ruotsalaisissa tutkimuksissa julkaistut tulokset (Gullberg ym. 1998, Erikson ja Norden 1999, Liss 1999). Timberjack 720 osoittautui tuottavuudeltaan kilpailukykyiseksi muihin kaato-kasauslaitteisiin verrattuna (Ihonen 1994, Perälä 1994, Nätt 1995, Kärhä ym. 2002, Kärhä ym. 2004). Tutkimustulosten mukaan lähimmäksi Timberjack 720:n tuottavuustasoa on päästy Naarva-Koura 1600-40:llä. Naarva-Kouralla keskimääräinen tuottavuus oli 4,7 m³/tehotunti, kun poistettavan puuston keskikoko oli 32 dm³.

Keräilevien kaato-kasaus-kourien kehitystyö on vielä kesken ja oletettavissa on, että kaato-kasauksen kustannukset tulevat laitteiden kehittyessä vielä alenemaan. Tällä hetkellä kourien kehittämisessä on kaksi kehityssuuntaa. Suunnittelussa lähtökohdaksi on otettu, että koura soveltuu joko pelkästään karsimattoman kokopuun korjuuseen tai sillä voidaan korjata sekä ainespuuta että kokopuuta. Yhdistettyyn aines- ja energiapuun hakkuuseen soveltuvat kourat ovat käyttökelpoisia puustoltaan vaihtelevilla työmailla, joilla on kuitu- ja energiapuukuvioita sekä näiden yhdistelmiä. Rulla- ja telasyöttöisillä hakkuulaitteilla on myös mahdollista tehdä karsittua rankaa

(Kärhä 2004a ja 2004b, Lehtimäki 2004) .

Energiapuukouriin ei ole olemassa mittalaitetta tai mittausten menetelmää, joka olisi riittävän tarkka ja nopea työsuorituksen maksuperusteeksi tai energiapuunhankinnan organisoinnin tarpeisiin. Korjattua energiapuuta mitataan nykyisin pinomittalla tienvarressa, hakkeena haketuksen jälkeen tai metsätraktorin kuormainvään avulla. Tässä tutkimuksessa käytetty kaadettujen puiden kantolämpimittaan perustuva mittaustapa soveltuu hitautensa ja kalleutensa takia pelkästään aikatutkimusten mittausten menetelmäksi.

Metsäkoneisiin lisättävät katkaisu- ja keräilylaitteet kohentavat koneiden työllisyyttä ja vähentävät kausivaihtelua ja siten parantavat toiminnan kannattavuutta. Pienpuun korjuussa konekapasiteettien yhteensovittaminen on ongelmallista, sillä energiapuun metsäkuljetuksessa ajokoneen kuljetuskapasiteetti vastaa 2–3 koneen kaato-kasauskapasiteettia. Energiapuukorjuri on sopiva vaihtoehto silloin, kun ajokoneella ei ole energiapuun metsäkuljetuksen lisäksi muuta työtä.

Tässä tutkimuksessa esitetty energiapuun korjuukustannusten ja kertymien analysointimenetelmä on tarkoitettu suuralueen energiapuunhankinnan ja suunnittelun päätöksenteon tukemiseen. Menetelmällä voidaan tarkastella eri korjuumenetelmien keskinäistä kilpailukykyä sekä ekologis-taloudellisten rajoitteiden vaikutusta kertymiin ja käyttöpaikkahintoihin maan eri osissa. Pienpuun alueellisia kertymiä ja korjuukustannustietoja voi edelleen tarkentaa mm. selvittämällä hakkepuun kysyntä-tarjontatilanne sekä käyttöpaikkojen sijainti ko. laskenta-alueella.

Kirjallisuus

- Asikainen A., Ranta T., Laitila J. & Hämäläinen J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 131. 107 s.
- Bergkvist, I. 2003. Flerträdshantering höjer prestationen och ökar nettot i klen gallring. Skogforsk, Resultat 5. 4 s.
- Erikson, P. & Nordén, B. 1999. Bränsleuttag i bestånd med eftersatt röjning – ett alternativ till motormanuell röjning. Skogforsk, Resultat 7. 4 s.
- Granvik, B–A. 1993. Puu- ja metsäteknologian käsitteitä ja termejä. Osa 2: Metsäteknologia. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 1.
- Gullberg, T., Johanson, J. & Liss, J-E. 1998. Studie av system EnHar vid uttag av skogsenergi i unga bestånd – Hamrestudien. Högskolan Dalarna, Skogsindustriella Institutionen, Arbetsdokument 9. 24 s.
- Haarlas R., Harstela P., Mikkonen E., Mäkelä J. 1984. Metsätyöntutkimus. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 46. 50 s.
- 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. Teknologiaohjelmaraaportti 5. 135 s.
- Hakkila, P. & Fredrikson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- Ihonen, M. 1994. Maataloustraktorin AM 200-hakkuulaite ensiharvennuksessa. Työtehoseuran metsätiedote 3(526). 4 s.
- Ihonen, M. 1994. Maataloustraktorin keräävä AM 230-kaatolaite kokopuuhakkuussa. Työtehoseuran metsätiedote 13(536). 4 s.
- Johansson, J. & Gullberg, T. 2002. Multiple tree handling in the selective felling and bunching of small trees in dense stands. International Journal of Forest Engineering 13(2): sivut 25-34.
- Jylhä, P., Keskinen, N. & Kokko, A. 2003. Ensiharvennussäntöpaalaaminen osapuuna integroidussa aines- ja energiapuun korjuussa. Hankkeen 7121 loppuraportti UPM-Kymmene Oyj:lle. Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema. 32 s.
- Kahala, M. 1979. Puutavaran metsäkuljetus ja siihen vaikuttavat tekijät. Metsätehon tiedotus 355. 30 s.
- Keskimölä, A. & Malinen, J. 1997. Lapin metsänkäyttöskenaarioiden energiapuukertymät. Metsätieteen aikakauskirja 3: 375-388.
- 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.
- 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.
- Korpilahti, A. 1996. Kuormatilojen kehittäminen energiapuun kuljetusta varten. Metsätehon raportti 13, 35 s.
- 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. 2004a. Pienpuun hakkuun tuottavuus nousuun. Bioenergia 2: 12-13.
- Kärhä, K. 2004b. Keto Forst Energy ja Valmet 945 saksikieliset hakkuulaitteet energiapuun hakkuussa. Metsätehon Katsaus 1. 4 s.
- Kärhä, K., Jouhioho, J., Mutikainen, A. & Mattila, S. 2002. Joukkokäsittely Naarva-Koura energiapuun hakkuussa. Työtehoseuran metsätiedote 12(655). 4 s.
- Kärhä, K., Jouhioho, J., Mutikainen, A. & Mattila, S. 2004. Mechanized energy wood harvesting from early thinnings. Hyväksytty käsikirjoitus Journal of Forest Engineeringiin. 15 s.
- Laitila, J. 2000. Puupolttoaineiden hankinta Oy Alholmens Kraft Ab:n voimalaitokselle. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Pro gradu 2000. 47 s. + liitteet 10 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.
- Lehtimäki, J. 2004. Energiapuuta ensiharvennuksista joukkokäsittelyllä. Bioenergia 2: 14-15.
- Lilleberg, R. 1994. Yhdistelmäkone koko- ja osapuun korjuuseen. Metsäteho. Moniste 17.6.1994. 9 s.
- Lilleberg, R. 1995. Naarva-Kouralla varustettu yhdistelmäkone ensiharvennusmännikössä. Metsäteho. Moniste 11.9.1995. 11 s.
- Liss, J.-E. 1999. Studie av system EnHar vid uttag av skogsenergi i unga bestånd – L:a Främsbacka. Högskolan Dalarna, Skogsindustriella Institutionen, Arbetsdokument 8. 28 s.
- Malinen, J. & Pesonen, M. 1996. Etelä-Suomen energiapuutarat. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 610. 33 s.
- Mielikäinen, K., Hirvelä, H., Härkönen, K. & Malinen J. 1995. Energiapuun osana metsänkasvatusta Keski-Pohjanmaalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 556. 56 s.
- Metsäalan palkkaus, 2003. Puu- ja erityisalojen liitto, Helsinki. 48 s.
- Mäkelä M. 1986. Metsäkoneiden kustannuslaskenta. Metsätehon monisteita. 21 s.
- Nurmi, J. 1993. Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.
- Nurmi, J. 2000. Characteristics and storage of whole-tree biomass for energy. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 758.
- Näslund, M. 1937. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt 29: 1-169.
- Nätt, H. 1995. Haka 110 -kourasaha nuoren metsän käsittelyssä. Työtehoseuran metsätiedote 1(539). 4 s.
- Pasanen, K., Vesterlin, V., Keskimölä, A., Soimasuo, J. & Tokola, T. 1997. Alueellisten energiapuutarvojen analysointimenetelmä. Metsätieteen aikakauskirja 1: 25-35.
- Peltola, H. 1976. Kokopuuraaka-aineen autokuljetus. Metsätehon tiedotus 340. 16 s.
- Perälä, Y. 1994. Haka 100-kourasaha taimikonhoidossa ja nuoren metsän kunnostuksessa. Työtehoseuran metsätiedote 4(527). 4 s.
- Ranta, T. 2002. Logging residues from regeneration fellings for biofuel production – a GIS-based availability and supply cost analysis. Acta Universitatis 128. Lappeenranta University of Technology 2002. 180 s.

- Rinne, S. 1998. Uudistushakkuutähteet suoraan laitokselle -ketju. Bioenergian tutkimusohjelma Y 120. 37 s.
- Sirén, M. 2002 (toim.) Ensiharvennusten korjuuolot ja niiden parantamismahdollisuudet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 837. 56 s.
- Tanttu, V. 1999. Joukkokäsittelyhakkuukone männikön ensiharvennuksessa. Metsäteknologian tutkielma MMM-tutkintoa varten. Helsingin yliopisto, maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. 84 s. + 15 s. liitteitä.
- 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/2000: 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.
- www.metinfo.fi. 2004. (www-dokumentti). <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/index.htm#metsavarat>
- www.metinfo.fi/laatuseloste. 2004. (www-dokumentti). <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/index.htm#metsavarat>
- www.metsavastaa.fi.2004.(www-dokumentti). <http://www.metsavastaa.net/index.cfm?docID=2398>
- www.timberjack.fi. 2003. (www-dokumentti). <http://www.timberjack.fi/uutiset/esitteet.htm>
- Ylitalo, E. 2004. Puupolttoaineiden käyttö energiantuotannossa 2003. Metsätilastotiedote 719. 7 s.

Liite 1.

Korjuukustannusten laskentaperusteet. Kp-haketus tarkoittaa käyttöpaikkahaketusta.

	Välivarastohaketus	Kokopuu & kp-haketus	Kokopuupaali & kp-haketus
Muut kustannukset			
Organisaatiokulut	2 €/m ³	2 €/m ³	2 €/m ³
Kaato-kasaus			
- Konetyö	65 €/h	65 €/h	65 €/h
- Metsurityö	153 tai 156 €/pvä	153 tai 156 €/pvä	153 tai 156 €/pvä
Kokopuun talteensaanto	100 %	100 %	100 %
Kokopuun paalaus	-	-	3,5 €/paali
Metsäkuljetus			
Kuormakoko	6,2 m ³	6,2 m ³	6,2 m ³
Tuntikustannus	47 €/h	47 €/h	47 €/h
Kaukokuljetus			
Kuormakoko	44,4 m ³	20 tai 30 m ³	41,6 m ³ eli 66 paalia
Kuormausaika	1,3 h	1,1 h	0,75 h
Purkuaika	0,5 h	0,5 h	0,5 h
Ajotuntikustannus	76 €/h	75 €/h	69 €/h
K&P-kustannus	53 €/h	52 €/h	47 €/h
Haketus			
Kustannus	5,3 €/m ³	1,8 €/m ³	1,8 €/m ³