



Energiapuun hankinta taimikon harvennuksen ja ensiharvennuksen yhteydessä

Bioenergian tutkimusohjelmassa saavutettujen tulosten arviointi

Tutkimusohjelman johtoryhmän toimeksianto

Jarmo Hämäläinen
Antti Korpilahti

Metsätehon raportti 58
16.11.1998

Ulkopuolinen hanke: Bioenergian tutkimusohjelma

Jakelu: Tutkimusohjelman johtoryhmä ja Metsätehon osakkaat

Asiasanat: bioenergia, puupolttoaine, taimikonhoito,
ensiharvennus, joukkokäsittely, ketjukarsinta

© Metsäteho Oy

Helsinki 1998

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
1 JOHDANTO	4
2 ENERGIAPUUN KORJUU TAIMIKOISTA	4
2.1 Aineisto.....	4
2.2 Vaihtoehtoiset tuotantoketjut	5
2.3 Tutkimusohjelmassa saavutettuja tuloksia.....	6
2.3.1 Siirtelykaato ja Chipset -palstahaketus	6
2.3.2 Siirtelykaato, kuormatraktorikuljetus ja varastohaketus	7
2.3.3 Koneellinen keräilykaato ja ketjukarsinta-kuorinta-haketus .	7
2.3.4 Muita vaihtoehtoja	9
2.4 Tuotantoketjujen arviointi	9
3 ENSIHARVENNUSTEN TUOTANTOKETJUT	12
3.1 Aineisto.....	12
3.2 Vaihtoehtoiset tuotantoketjut	13
3.3 Tuotantokustannusten perusteet	16
3.4 Tutkimusohjelmassa saavutettuja tuloksia.....	19
3.4.1 Ensiharvennusten puupolttoainepotentiaali	19
3.4.2 Osa- ja kokopuunakorjuuseen perustuvat menetelmät.....	22
3.4.3 Kokopuuhakkeeseen perustuvat menetelmät.....	27
3.5 Tuotantoketjujen arviointi	29
4 VERTAILU OHJELMAN TAVOITTEISIIN	31

TIIVISTELMÄ

Selvityksessä arvioitiin sitä, missä määrin Bioenergia-tutkimusohjelman tavoitteet on saavutettu taimikoista ja ensiharvennusemetsistä tapahtuvassa puupolttoaineiden tuotannossa. Selvitykseen on koottu yhteenveto ohjelmassa saavutetuista tuloksista ja verrattu niitä Bioenergiaohjelmassa asetettuihin tavoitteisiin.

Kustannustehokkaimmat menetelmät energiapuun korjaamiseksi taimikoiden harvennuksesta ovat nykyisin siirtelykaatoon ja palstahaketukseen sekä siirtelykaatoon ja välivarastolla haketukseen perustuvat ketjut. Palstahaketukseen perustuvalla menetelmällä saavutetaan alle 50 km:n kuljetusmatkoilla energiapuun suurkanäytön tavoitteen, 45 mk:n/MWh, mukainen kustannustaso. Tämä edellyttää kuitenkin nuoren metsän hoitoon ja energiapuun korjuuseen saatavia valtion tukia, joiden merkitys on noin 20 mk/MWh.

Taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmäkäsittely, jossa otetaan talteen sekä energia- että teollisuuspuuta, on kiinnostava, tulevaisuudessa kysymykseen tuleva vaihtoehto ylitiehoitettujen nuorten metsien käsittelyyn.

Bioenergian tutkimusohjelma on tuottanut ratkaisumalleja ja tietoa ensiharvennukseen integroituun hankintaan ja prosessointiin. Ketjukarsintapienrumpukuorinta näyttää toimivalta ja kilpailukykyiseltä konseptilta, jolla voidaan prosessoida karsimatonta puutavaraa. Myös käsittely tehdaskuorimoiden kuorimarummuilla olisi mahdollista, mutta tehtaiden nykyisillä voimalaitoksilla on vain vähän mahdollisuuksia lisätä kiinteän polttoaineen käyttöä. Pienikokoisen ensiharvennukseen korjuu olisi edullisinta joukkohakkuuna, mutta se lisää polttojakeen kertymistä vain vähän. Ohjelmassa kehitetyillä ensiharvennukseen integroiduilla tuotantomenetelmillä on mahdollista päästä kustannuksissa alle 45 mk:n/MWh tavoitetasoon.

Korjattavissa oleva energiapuupotentiaali varttuneista taimikoista on 1,2 milj. m³/a ja ensiharvennuksesta 5 milj. m³/a. Ne vastaavat yhteensä 1,1 ekvivalentista öljytonnia vuodessa.

1 JOHDANTO

Valtakunnallisen Bioenergian tutkimusohjelman (1992–1998) toiminta-ajatuksena on teknisen tutkimus- ja kehitystyön keinoin lisätä taloudellisesti kannattavaa ja ympäristöystävällistä bioenergian käyttöä parantamalla nykyisten puu- ja turvepolttoaineiden kilpailukykyä, kehittämällä uusia kilpailukykyisiä biopolttoaineita sekä bioenergian käyttöön ja jalostukseen liittyvää teknologiaa.

Ohjelman päätavoite on kehittää uusia puupolttoaineiden tuotantomenetelmiä, joilla tuotettu polttoaine on kilpailukykyistä tuontipolttoaineisiin nähden ja yhteenlaskettu lisäkäyttöpotentiaali vähintään 1 milj. toe/a eli n. 5,5 milj. m³. Puupolttoaineiden tuotannon kustannustavoitteeksi on asetettu 45 mk/MWh aina 100 km:n kuljetusetäisyydeltä asti, kun polttoainetta tuotetaan suurkanäyttöön

Tämä selvitys on tehty bioenergian tutkimusohjelman johtoryhmän toimeksiannosta, ja siinä on arvioitu sitä, missä määrin tutkimusohjelman tavoitteet on saavutettu taimikoista ja ensiharvennusemetsistä tapahtuvassa puupolttoaineiden tuotannossa. Työssä on tarkasteltu

- kaupallisen asteen saavuttaneita uusia tuotantomenetelmiä
- hyvin lähellä kaupallistamista olevia menetelmiä
- uusien ruotsalaisten teknologioiden soveltamista suomalaisiin olosuhteisiin
- tuotantokustannusten herkkyyttä tärkeimpien olosuhdemuuttujien suhteen.

2 ENERGIAPUUN KORJUU TAIMIKOISTA

2.1 Aineisto

Puupolttoaineen tuotantoa taimikon harvennuksen tai pienirunkoisten kunnostushakkuiden yhteydessä on tarkasteltu erityisesti seuraavissa Bioenergiaohjelman projekteissa:

- 113 Energiapuun korjuu taimikonhoidon yhteydessä (Naarva-keräilykaatolaite)
- 128 Energiapuun korjuu taimikonhoidon yhteydessä (Chipset-hakeharvesteri)
- 130 Metsänomistajien energiapuun korjuutekniikat
- 138 Energia- ja teollisuuspuun korjuu taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmässä.

Lisäksi aihetta on käsitelty ohjelman bioenergiapotentiaalia koskevissa selvityksissä sekä energiapuun hankintaa koskevissa käytännön demonstraatioissa. Taimikonhoitopuun korjuumenetelmiä ja -tekniikkaa on selvitelty viime vuosina myös ruotsalaisissa bioenergiatutkimuksissa.

2.2 Vaihtoehtoiset tuotantoketjut

Taimikon harvennuksella säädellään taimikon tiheyttä ja puulajisuhteita. Taimikon harvennus pyritään nykyisin tekemään aiempaa myöhemmin, kun puusto on savuttanut 4 - 8 metrin pituuden. Siirtämisellä pyritään parantamaan puiden teknistä laatua ja koneellisen ensiharvennuksen toteutusta. Harvennuskohteiden puusto on aiempaa järeämpää, mikä vaikeuttaa työolosuhteita ja lisää kustannuksia, mutta antaa samalla paremmat edellytykset työn koneellistamiseen ja energiapuun korjuuseen. On huomattava, että taimikon käsittelytarve ja sen ajoitus riippuvat kasvupaikan ominaisuuksista sekä viljelyn ja luontaisen taimettumisen tuloksista, joten kasvatusketjut vaihtelevat käytännössä hyvin tapauskohtaisesti. Havupuutaimikko joudutaan usein vapauttamaan ylimääräisestä lehtipuustosta jo ennen varsinaista harvennusta. Tuolloin kaadettava puusto on niin pientä, ettei sen talteenotto ole tarkoituksenmukaista.

Vuotuinen taimikonhoitoala on ollut yleensä noin 200 000 ha, mutta viime vuosina se on pienentynyt runsaaseen 100 000 hehtaariin. Taimikoista on arvioitu saatavan noin 1,2 milj. m³ energiapuuta vuodessa. Potentiaali saattaa olla arvioitua huomattavasti suurempi siinä vaiheessa kun taimikonhoito-ohjeissa tapahtuneet muutokset täysimääräisesti, käytännössä 5 - 10 vuoden kuluessa, toteutuvat. Samaan suuntaan vaikuttaa lähivuosina myös hoitamatta jääneisiin taimikoihin (450 000 ha) sisältyvä energiapuu, mikäli hoitotyöt saadaan käyntiin. Talteen otettavaan määrään vaikuttaa luonnollisesti myös korjuutekniikan kehitys, jota tarkastellaan jäljempänä.

Nuorten metsien käsittelyn jakaminen esikaupalliseen taimikonhoitoon ja kaupalliseen ensiharvennukseen perustuu perinteisen teollisuuspuun mitat täyttävän puun hyödyntämiseen. Sitä mukaa kun energiapuun markkinat ja energia- ja ainespuun erottelutekniikat kehittyvät, nuorten metsien käsittelyvaihtoehtoja voidaan tarkastella entistä joustavammin, yhtenä kokonaisuutena. Kysymykseen saattaa tulla esim. menettely, jossa nuoren metsän harvennus tehdään vain kertaalleen, perinteisen taimikon harvennuksen ja ensiharvennuksen yhdistelmänä. Yhdistetyssä käsittelyssä korjataan sekä energia-että ainespuuta ja tarvittaessa kaadetaan osa pienimmästä puustosta maahan.

Tässä osassa tarkastellaan energiapuun korjuun kannattavuutta varttuneen taimikon harvennuksessa sekä taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmässä. Taimikonhoito tehdään normaalisti kaatamalla harvennuspuut raivaus-sahatyönä maahan. Energiapuuta voidaan ottaa talteen kokonaan koneellisin menetelmin tai ihmis- ja konetyötä yhdistäen. Koska käsiteltävät puut ovat pienikokoisia ja niitä on tiheässä, kokopuukorjuuseen ja eriasteiseen joukkokäsittelyyn perustuvat ketjut ovat tehokkaimpia. Tässä on tarkasteltu seuraavista, tällä hetkellä lupaavimmista menetelmistä saatuja tuloksia:

1. Siirtelykaato ihmistyönä, Chipset-palstahakkuri
2. Siirtelykaato ihmistyönä, kuljetus kuormatraktorilla, haketus varastolla
3. Koneellinen keräilykaato, kuljetus metsätraktorilla, ketjukarsinta-kuorinta-haketus tehtaalla

Lisäksi on tarkasteltu muita menetelmiä, joita on kokeiltu ohjelman yhteydessä, mutta joiden kannattavuus ei ole vielä soveltamiskelpoisella tasolla.

2.3 Tutkimusohjelmassa saavutettuja tuloksia

2.3.1 Siirtelykaato ja Chipset-palstahaketus

Korjuumenetelmänä oli siirtelykaato miestyönä ja palstahaketus Chipset-palstahakkurilla. Lisäksi tarkasteltiin taimikkovaiheessa tehtävän energiapuun korjuun vaikutusta ensiharvennuksen kannattavuuteen. Poistettavien puiden lukumäärä oli tutkimuskohteilla 5 300 - 22 000 kpl/ha, keskipituus 2,7 - 5,0 m ja kokonaisbiomassa 26 - 75 m³/ha.

Siirtelykaato tehtiin kaatokahvoilla varustetuilla moottorisahoilla. Työhön kuului ajourien avaus ja urien välisen alueen harvennus sekä puiden kasaaminen kourakasoihin hakeharvesteria varten. Siirtelykaadon tuottavuus oli keskimäärin 2,8 kuutiometriä tehotunnissa ja vaihteli voimakkaasti poistuman määrän ja järeyden mukaan.

Työtehoseuran tutkimuksessa (P 130) siirtelykaadon tuottavuus lehtipuun kunnostushakkuussa oli 3,4 - 3,5 m³ tehotunnissa. Kohteiden puusto oli jonkin verran järeämpää kuin Metsätehon tutkimuksessa.

Palstahaketuksen tuotos oli keskimäärin 6,9 m³ käyttötuntia kohti. Haketus-kustannukset 250 metrin metsäkuljetusmatkalla olivat 59 mk/m³ ja korjuun kokonaiskustannukset 97 mk/m³.

TAULUKKO 1. Siirtelykaadon ja Chipset-haketuksen tuottavuus ja kustannukset Metsätehon tutkimuksessa.

	Tuottavuus, m ³ /h		Korjuukustannukset, mk/m ³		
	Kaato	Haketus	Kaato	Haketus	Yhteensä
Keskimäärin	2,8	6,9	38	59	97
Vaihteluväli	1,6 – 4,0	5,7 – 8,7	27 - 67	44 – 81	81 – 111

2.3.2 Siirtelykaato, kuormatraktorikuljetus ja varastohaketus

Tavanomaisin nykyinen menetelmä energiapuun korjuussa taimikoista ja kunnostushakkuista on kaato ja kasaus miestyönä ja kuljetus koko- tai osapuuna tien varteen haketettavaksi. Kokopuukorjuuseen perustuvan menetelmän kustannukset koostettiin eri tutkimuksissa esitetyistä tuloksista ja ne olivat taulukossa 2 esitetyn suuruiset.

TAULUKKO 2. Siirtelykaatoon perustuvan taimikonharvennuspun talteenoton kustannukset.

Korjuukustannukset, mk/m ³		
Siirtelykaato	Metsäkuljetus	Yhteensä
43	47	90

Siirtelykaadon yhteydessä voidaan ottaa tarvittaessa talteen myös ainespuuta, mikä tulee kysymykseen kunnostushakkuukohteissa. Kuormatraktorikuljetusta varten tehdyn siirtelykaadon tuottavuus on pienempi kuin palstahakettusta varten, koska ajoura joudutaan pitämään auki ja puut katkomaan kuljetuspituuteen.

Pienikokoisen kokopuun kuljetus ilman kuorman tiivistyslaitteita on kallista, koska kuorman koko jää pieneksi.

2.3.3 Koneellinen keräilykaato ja ketjukarsinta-kuorinta-haketus

Projektin tavoitteena oli selvittää taimikon harvennuksen ja ensiharvennuksen yhdistämisen teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä sekä vaikutuksia puuntuotantoon.

Tutkimuskohteina oli kaksi keskipituudeltaan noin 10 m:n mittaista metsikköä, joissa taimikon harvennus oli tekemättä. Toinen niistä oli mäntyvaltainen ja toinen koivuvaltainen. Lähtöpuuston tiheydet olivat molemmissa kohteissa noin 6 500 kpl/ha.

Kohteet harvennettiin noin 1 000 runkoon/ha, ja kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli 2 cm:n mittaiset harvennuspuidet pyrittiin korjaamaan talteen. Puusto hakattiin kokopuuna Sakari Monosen kehittämällä, joukkokäsittelyperiaatteella toimivalla keräilykaatolaitteella. Korjuukertymä oli männikössä 66 m³/ha ja koivikossa 88 m³/ha.

TAULUKKO 3. Hakkuun tuottavuus, kustannukset ja olosuhteet.

Kohde	Tuotos, m ³ /käyttötunti	Kustannukset, mk/m ³	Kertymä, m ³ /ha	Rungon koko, dm ³
Männikkö				
Keskimäärin	3,9	66	66	11
Vaihteluväli	2,5 – 7,5	35 – 103	31 – 97	5 - 18
Koivikko				
Keskimäärin	4,1	64	88	14
Vaihteluväli	2,9 – 5,0	52 – 89	72 – 112	8 - 19

Hakkuun käyttötuntituotos oli männikössä keskimäärin 3,9 m³ ja koivikossa 4,1 m³. Metsäkuljetuksen tuottavuus jäi ilman kuorman tiivistyslaitteita pieneksi ja oli keskimäärin 5,5 m³ käyttötunnissa. Kuljetuskustannukset olivat 47 mk/m³.

Korjuukustannukset olivat keskimäärin 112 mk/m³, kun metsäkuljetusmatka oli 250 m. Autokuljetuskustannukset olivat 100 km:n kuljetusmatkalla 37 mk/m³ eli noin 15 - 20 % korkeammat kuin tavaralajimenetelmällä hakatun ainespuun kuljetuskustannukset.

Kokopuut käsiteltiin kahdella erilaisella ketjukarsinta-kuorinta-haketusmenetelmällä. Toinen oli kiinteä ketjukarsinta-pienrumpuasema ja toinen siirrettävä Peterson Pacific -ketjukarsinta-kuorinta-haketuslaite. Selluhakkeen saanto oli mäntyerissä 50 – 61 % ja koivuerissä 65 – 66 % koko biomassasta. Hakkeen kuoripitoisuus oli männyllä 0,3 – 2,7 % ja koivulla 2,1 – 3,6 %. Ketjukarsinta-pienrumpuasemalla saatiin parempilaatuista haketta kuin siirrettävällä yksiköllä. Käsittelykustannukset olivat keskimäärin 31 mk/kiintokuutio kokopuuta.

Hakkeen saanto oli männyllä saman suuruinen ja koivulla suurempi kuin 5 cm:n minimiläpimittaa vastaava runkopuuositteiden määrä. Saanto oli 1,2 – 1,8-kertainen 7 cm:n minimiläpimittaa vastaavaan runkopuutilavuuteen verrattuna.

Selluhakkeen tuotantokustannukset olivat noin 320 mk/m³, kun energiahyvityksenä käytettiin 35 mk/MWh. Kustannukset olivat korkeammat kuin normaalilla ensiharvennusuulla, mutta samaa tasoa kuin tavaralajikorjuuseen (minimiläpimitta 7 cm) perustuvan tuotantoketjun kustannukset koetyömaiden olosuhteissa, joissa ainespuun mitat täyttävän puun kertymä ja rungon keskikoko olivat pieniä. Hankintaketjun kaikissa vaiheissa arvioitiin olevan huomattavaa kehityspotentiaalia. Korjuu- ja kuljetustekniikka, selluhakkeen kuituominaisuudet sekä kokopuukorjuun ravinnevaikutukset kaipaavat lisäselvityksiä.

2.3.4 Muita vaihtoehtoja

Tutkimusohjelmassa on kokeiltu koneellisia ratkaisuja pienpuun keräilykaatoon. Metsäteho kokeili Naarva-kaatolaitteella varustettua kuormatraktoria varttuneessa taimikossa. Korjuutuotos oli keskimäärin $1,4 \text{ m}^3$ tehotunnissa ($0,8 - 2,9 \text{ m}^3/\text{h}$). Korjuukustannukset olivat keskimäärin $190 \text{ mk}/\text{m}^3$ eli liian korkeat kannattavaa energiapuutuotantoa ajatellen. Nuorten metsien kunnostushakkuukokeiluissa tuottavuus on ollut saman tasoista.

Koneellisen keräilykaadon tuottavuuden tulisi olla vähintään 3,5 - 4 kuutiometriä käyttötunnissa, jotta menetelmä olisi kilpailukykyinen siirtelykaatoon perustuviin menetelmiin verrattuna.

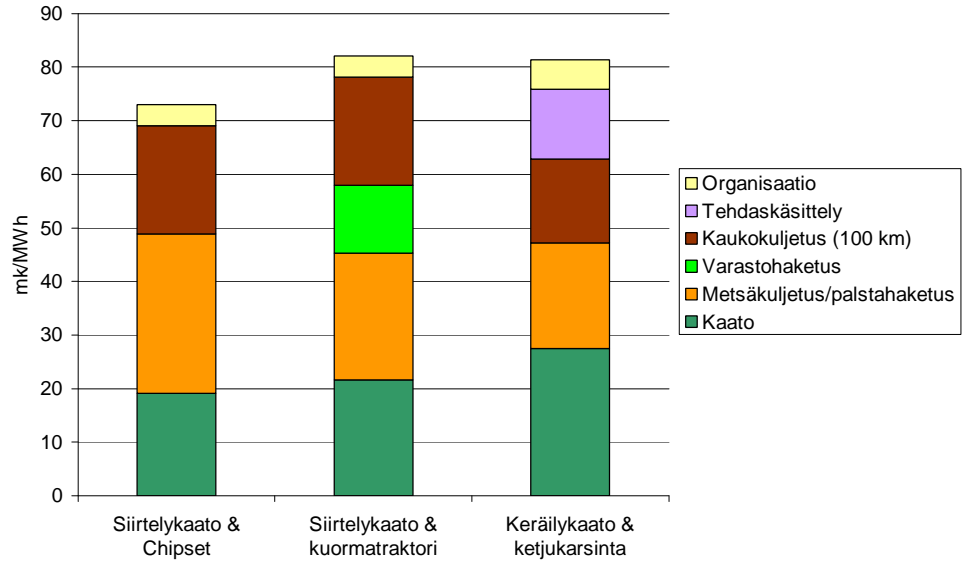
2.4 Tuotantoketjujen arviointi

Tuotantoketjujen kustannuslaskelmat tarkistettiin vastaamaan ohjelman loppuvaiheessa käytettävissä olevia menetelmiä ja niiden tuottavuutta. Laskelmissa käytettiin seuraavia perusteita:

Korjuukustannukset edellä esiteltyjen tutkimustulosten mukaisesti
Kuormatraktorin käyttötuntikustannukset $260 \text{ mk}/\text{h}$
Keräilykaatokoneen käyttötuntikustannukset $260 \text{ mk}/\text{h}$
Varastohaketuksen kustannukset $25 \text{ mk}/\text{m}^3$
Hakkeen kaukokuljetuksen kustannukset $40 \text{ mk}/\text{m}^3$ (100 km)
Kokopuun kaukokuljetuksen kustannukset $37 \text{ mk}/\text{m}^3$ (100 km)
Ketjukarsinta-pienrumpukuorinta-haketuksen kustannukset $31 \text{ mk}/\text{m}^3$
Yleiskustannukset $8 \text{ mk}/\text{m}^3$
Kantohinta ainespuulle $70 \text{ mk}/\text{m}^3$ (minimiläpimitta 7 cm)

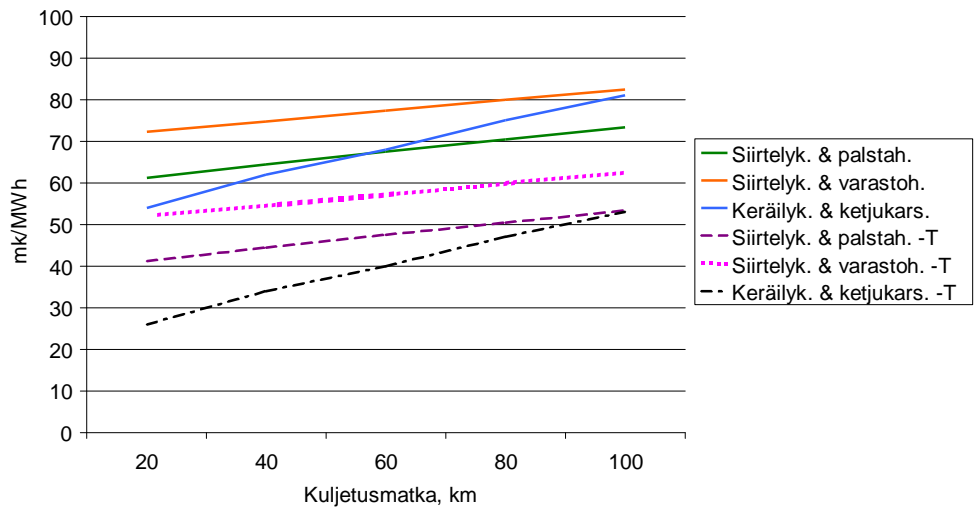
Taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmässä (keräilykaato ja ketjukarsinta-pienrumpukuorinta) selluhakkeen hintana käytettiin 259 mk:aa, mikä vastaa normaalia ensiharvennustilannetta. Loput hankintaketjun kustannuksista kohdistettiin energiaositteelle.

Siirtelykaatoon perustuvien ketjujen kokonaiskustannukset olivat 73 – 82 mk/MWh ja yhdistelmäkorjuun kustannukset 81 mk/MWh (kuva 1). Korjuuvaiheen osuus kokonaiskustannuksista oli yli puolet.



Kuva 1. Taimikon harvennuksen yhteydessä korjatun energiapuun tuotantokustannukset 100 km:n kuljetusmatkalla.

Kaukokuljetuskustannusten osuus kokonaiskustannuksista on noin neljännes 100 km:n kuljetusmatkalla. Kun kuljetusmatka lyhenee 50 kilometriin, kustannukset vähenevät 6 - 16 mk/MWh eli 7 - 20 % (kuva 2).



Kuva 2. Taimikon harvennuksessa korjatun energiapuun tuotantokustannukset kuljetusmatkan mukaan. Alemmissä kuvajissa on otettu huomioon valtion tuet (T).

Tuotantoketjun kustannuksia on tarkasteltu edellä ilman työhön myönnettäviä avustuksia. Nuoren metsän hoitotukea voi saada valtion varoista kohteesta riippuen 400 – 1 020 mk/ha ja lisäksi energiapuun korjuutukea 30 mk/m³. Tukien merkitys pelkässä energiapuun korjuussa oli esimerkkitapauksissa noin 20 mk/MWh ja integroidussa korjuussa 28 mk/MWh. Kun tuet otetaan huomioon siirtelykaatoon ja palstahaketukseen sekä integroituun korjuuseen perustuvilla ketjuilla päästään alle 45 mk:n/MWh kustannustasoon lyhyillä kuljetusmatkoilla.

Tulosten perusteella korjuu kannattaa suunnata kohteisiin, joissa biomassakertymä on vähintään 35 – 40 m³/ha ja kuljetusmatka alle 50 km.

Korjuukustannusten suuruutta arvioitaessa on huomattava myös se, että ylimääräinen pienpuusto on joka tapauksessa kaadettava ennen ensiharvennusta tai viimeistään sen yhteydessä. Maahan kaadosta aiheutuvat kustannukset kuuluvat normaaliin metsänhoitoon ja ovat tyypillistä energiapuukertymää kohti laskettuna 15 – 30 mk/m³ (7 – 15 mk/MWh).

Koneellisessa keräilykaadossa on vielä paljon kehittämistarvetta. Miestyönä tapahtuva siirtelykaato näyttää toistaiseksi ylivoimaiselta ratkaisulta koneellisiin keräilykaatolaitteisiin verrattuna. Kokeilluissa laitteissa on kuitenkin kehittämispotentiaalia, ja tuottavuutta voidaan parantaa. Ruotsissa on esitelty muutamia uusia laiteratkaisuja. Niiden tuottavuus on kuitenkin jäänyt alustavissa kokeiluissa suunnilleen samalle tasolle suomalaisten laitteiden kanssa.

Kokopuukuorman tiivistäminen metsä- ja kaukokuljetusvaiheissa vaikuttaisi myös merkittävästi kustannuksiin. Pienestä harvennuspöystä koottu kuorma jää kiintotilavuudeltaan pieneksi, jolloin kuljetuskustannukset ovat korkeat. Kuorman tiivistämiskäytännöt on kokeiltu, mutta niiden kaupallistaminen vaatii vielä jatkokehittelyä.

Taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmässä selluhakkeen erottaminen pienikokoisesta kokopuusta onnistui hyvin ja hakkeen kuoripitoisuus ja palakokojakauma olivat parhaimmillaan tavoitteen mukaisia. Hakkeen kuituominaisuudet ja arvo vaativat kuitenkin lisäselvityksiä.

Nuoren metsän hoitovaiheessa tehtävä energiapuun korjuu vaikuttaa metsän ravinnetaseeseen. Kokopuukorjuun vaikutuksista metsikön kasvuun on saatu eri tutkimuksissa osin ristiriitaisia tuloksia. On kuitenkin ilmeistä, että koko biomassan talteenotosta on syytä pidättäytyä karuimmilla kasvupaikoilla. Ravinnekysymykset on syytä ottaa huomioon menetelmien soveltamisessa ja jatkokehittelyssä.

3 ENSIHARVENNUSTEN TUOTANTOKETJUT

3.1 Aineisto

Puupolttoaineen tuotantoa ensiharvennuksista on tutkittu tai kehitetty suur-
tuotannon ja -käytön näkökulmasta seuraavissa 25:ssä bioenergian tutkimus-
ohjelman projektissa.

- 101 Integroitu puupolttoaineen ja teollisuuden ainespuun tuotanto ketju-
karsinta-kuorintatekniikalla
- 102 Puun korjuu palahakkeena ja monivaiheinen lastuaminen
- 104 MASSAHAKE-menetelmän soveltaminen koivulle sekä mekaanisen
massan raaka-ainetuotantoon
- 105 Biomassatase ja energiapuun kertymä ensiharvennuksissa
- 106 Pienpuun keräilykaatoon perustuvan harvennuskoneen kehittäminen
- 107 Joukkokäsittelyharvesterin kehittäminen
- 109 Metsänkasvatus ja harvennusvaihtoehdot
- 110 Hake-, puu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan
kuitu- ja energiapuun hankinnassa
- 119 Ketjukarsinta- ja pienrumpukuorintaan perustuvan laitteiston kehit-
täminen tuotantovalmiiksi
- 120 Ketjuharja-menetelmä puun karsinnassa ja kuorinnassa
- 122 Kauko-ohjattavan harvennuskoneen kehittäminen
- 124 Integroitujen tuotantomenetelmien vertailu
- 133 Ensiharvennuspuun hyödyntäminen
- 137 Karsimattoman puun korjuu ensiharvennuksilta

- Y106 Teollisuuden ainespuun ja puupolttoaineen integroitu tuotanto
- Y114 Integroitu energiapuun tuotantomenetelmä Pohjois-Suomessa
- Y113 Harvennuspuun automaattisen nippukorjausharvesterin kehittäminen
- Y115 Yhdistelmäkoneen kehittäminen pienpuun korjuuseen sekä ensihar-
vennukseen
- Y117 Kokopuuhakkeen puhdistusprosessin kilpailukyvyyn parantaminen
- Y118 Pystypuuston katkaisuhakettimen proto

- D102 Pienpuun karsinta-kuorinta
- D103 Poltojakeen hankinta puun yhdistelmäkorjuussa
- D105 Energiapuuvarat ja niiden hyödyntämisedellytykset
- D108 MASSAHAKE-demonstraatiolaitoksen seuranta
- D110 Potentiaaliset hakkuumahdollisuudet ja energiapuuvarat Etelä-
Suomessa

Lisäksi aihetta on käsitelty mm. tutkimusohjelman alkuvaiheessa tehdyssä
selvityksessä Puupolttoaineiden tuotantomenetelmät; Nykytekniikka, kustan-
nukset ja kehittämismahdollisuudet, Näkökohtia kuormatilojen kehittämisestä
energiapuun kuljetusta varten sekä Puupolttoaineiden tuotannon tutkimus- ja
kehitystyön suuntaaminen vuosille 1996-98. Ruotsalainen tutkimuslaitos

SkogForsk on julkaissut puupolttoaineen tuotannosta kaksi laajaa kokooma-raporttia, ensimmäisen vuonna 1994 ja toisen kesällä 1998.

Varsinaiset tutkimusohjelman projektit jakautuvat aiheittain seuraavasti:

- perusteiden (puuaineen, biomassan) tutkimus	2 projektia
- biomassavarojen määrittäminen	3
- korjuuvaiheen ja -laitteiden kehittäminen	6
- ketjukarsintamenetelmä ja -laitteet	7
- MASSAHAKE-menetelmä	3
- palahakemenetelmä	1
- kokonaisvaltaiset tarkastelut	3

Jako on suuntaa antava, sillä esimerkiksi koko tuotantoketjuja koskevissa tarkasteluissa on tutkittu sekä korjuumenetelmiä että tehty perustutkimukseen kuuluvia puuaineen ominaisuusmäärittäksiä, ainespuun osalta sellun saantomäärittäksiä ja paperiteknisten ominaisuuksien mittausta. Biomassavarojen määrittäykseen sisältyy metsänkäsittelyyn ja energiapuuvarojen määrään liittyvää tarkastelua, jossa ensiharvennuspuu on yhtenä osana.

Pääosa tutkimuksista on kohdistunut ensiharvennusmäntyyn. Koivusta on tuotettu jonkin verran tutkimustuloksia, ja niiden ja aiempien tietojen perusteella on tehty vertailulaskelmia. Kuusta koskevat tutkimusohjelmassa esitetyt tarkastelut perustuvat suurelta osin aiempaan tietoon. Tässä selvityksessä arvioidaan tutkimusohjelmassa saavutettuja tuloksia edellä mainittujen tietojen ja niiden pohjalta tehtyjen vertailulaskelmien perusteella.

3.2 Vaihtoehtoiset tuotantoketjut

Puunkorjuun valtamenetelmä Suomessa on karsittujen puutavaralajien hakkuu palstalla ja metsäkuljetus kuormatraktorilla. Nykyisen kustannustason mukaan täyskoneellinen korjuuketju on moottorisahahakkuuseen perustuvaa ketjua edullisempi myös ensiharvennuksissa. Siksi tässä tarkastelussa vertailumenetelmänä on koneellinen korjuu karsituiksi tavaralajeiksi.

Sellunvalmistukseen käytettävä kuitupuun valmistetaan yleensä 7 cm:n latvaläpimittaan. Puuaineen ominaisuuksia koskevien tutkimustulosten mukaan mäntykuitupuun voitaisiin ottaa viiteen senttimetriin asti, jos kriteerinä pidetään kahden millimetrin kuidunpituutta. 5 cm:n latvaläpimittaan on usein otettu toiseksi tutkimuksissa ja tarkasteluissa käytetyksi katkaisuläpimitaksi.

Keräilykaato ja puunipun karsinta ja katkonta joukkohakkuulaitteella lisää hakkuun tuottavuutta tavanomaiseen yksinpuinhakkuuseen verrattuna. Puunippu kuitenkin karsiutuu hyvin, biomassaa kertyy vain noin 5 - 10 % enemmän kuin kuitupuumenetelmässä. Vain männyn joukkohakkuuta on tutkittu. Koivulla latvusraja voi olla niin korkealla, että joukkohakkuu ei juurikaan lisää latvusmassan talteenottoa. Joukkohakkuu onkin vertailuissa mukana tavallaan toisena, potentiaalisena kuitupuuksi hakkuun menetelmänä; sen käyttö on toistaiseksi jäänyt kokeiluiksi. Vaikka joukkohakkuussa latvusmas-

san lisäys jää pieneksi, menetelmän käyttöönotto edistäisi merkittävästi bioenergian käyttöä, jos sen myötä ensiharvennusten määrää saataisiin lisättyä. Selluntuotannossa tavanomaisesta kuitupuustakin noin 40 % biomassasta ohjautuu energiantuotantoon, ja kun joukkohakkuussa sovelletaan tavanomaista pienempää latvaläpimittaa, energiaosittien osuus suurenee sitäkin kautta.

Varsinaisia integroituja energia-ainespuumenetelmiä ovat osapuumenetelmät ja kokopuuhakkeeseen perustuva tuotanto. Osapuulla tarkoitetaan karsimantonta, kuljetuspituuksiin katkottua puutavaraa. Osapuu yleensä katkaistaan latvasta, esimerkiksi viiden sentin minimiläpimitan mukaan. Kokopuuna korjattaessa latvakappaleetkin otetaan talteen, jolloin energiajakeen määrä maksimituu.

Yksinkertaisin tapa prosessoida **osapuuta** on syöttää sitä tavanomaisen kuitupuun kanssa **kuorimarumpuun**. Muusta kuitupuusta eriytettyä osapuun prosessointia on tehty liikuteltavilla ketjukarsintalaitteilla ja kiinteällä ketjukarsinta-pienrumpukuorinta-asemalla. Kolmas vaihtoehto on kuljettaa osapuut käsittelyasemalle, jossa ne haketetaan ja syntyvä hake erotetaan MASSAHAKE-menetelmällä sellu- ja polttihakkeeksi.

Ketjukarsinta aloitettiin pohjoisamerikkalaisella hinattavalla lavettialustaisella Peterson Pacific -ketjukarsintakuorinta-hakurilla, jonka hankki Pertti Szepaniak Oy. Sittemmin Hooli Oy rakensi kuorma-autoalustaisen ketjukarsijan, jossa oli vasaramurskain kuori- ja oksamurskeen hienontamiseksi käyttövalmiiksi. Liikuteltavien ketjukarsijoiden käyttöajatuksena oli eriyttää ensiharvennus- ja muunkin pienpuun prosessointi muusta kuitupuusta sekä mahdollistaa ainespuujakeen ja polttoaineen toimitus eri käyttäjille. Liikuteltavien ketjukarsijoiden pelkästään ketjukarsintaan perustuvalla kuorinnalla ei kuitenkaan saavutettu riittävän hyvää kuorintatulosta, ja niiden käyttö ei päässyt laajenemaan. Kiinteällä asemalla kuorintatavoitteeseen voidaan päästä, kun kuorinta suoritetaan loppuun pienellä kuorimarummulla.

Osapuuta korjataan ja käytetään tavanomaisen kuitupuun ohessa vähäisiä määriä Pohjois-Suomessa. Sen prosessointi on mahdollista myös Pertti Szepaniak Oy:n ketjukarsinta-pienrumpukuorinta-asemalla Imatralla. Osapuuna-korjuun kalusto ei ole vielä pitkälle kehitettyä.

Kokopuuhaketus palstalla ja hakkeen käsittely konttilasteittain tarjoaa kiinnostavan ratkaisun materiaalinkäsittelyn rationaalisointiin. Energia- ja ainespuujakeiden erotteluun on kehitetty MASSAHAKE-menetelmä. Kun menetelmää soveltava laitos varustetaan hakurilla, se voi ottaa vastaan osa- ja kokopuutakin. Kokopuuhaketusta on kokeiltu Chipset-palstahakurilla polttihakkeen tuotantotutkimusten yhteydessä.

Palahakemenetelmässä ajatuksena oli katkoa karsimaton ensiharvennuspuu hakkuun yhteydessä palstalla lyhyiksi, muutaman kymmenen sentin pituisiksi paloiksi, konttikuljetus sekä metsäkuljetuksessa että kaukokuljetuksessa, ja prosessointi tehtaalla. Menetelmän ideoijien kuvitelma puupalakorjuun ja

kuljetuksen kilpailukyvyistä muihin korjuumenetelmiin verrattuna osoittautui vääräksi, eikä palamenetelmällä siksi ollut soveltamisedellytyksiä. Palat kuo-riutuivat hyvin tavanomaisessa rumpukuorinnassa kuitupuutavaran joukossa ja ne saatiin pätkäerottimella erilleen muusta kuitupuusta. Myös palojen ha- ketusta teräkehälastuajalla kokeiltiin; sillä ei kuitenkaan ollut yhteyttä ener- gijakeen tuotannon kanssa.

Tässä arvioinnissa vertaillaan seuraavia tuotantoketjuja:

- kuitupuumenetelmä, rumpukuorinta
- joukkohakkuu, rumpukuorinta
- osapuunakorjuu, prosessointimenetelmänä:
 - rumpukuorinta
 - ketjukarsinta-pienrumpukuorinta
- MASSAHAKE-menetelmä
- kokopuuhaketus palstalla, puhdistus MASSAHAKE-menetelmällä

Puun talteenotto ensiharvennuksista on pienen rungonkoon ja hakkuukerty- män vuoksi kallista tavanomaisilla yhden puun käsittelyyn perustuvilla hak- kuulaitteilla. Myös energiaositteiden määrä on niin pieni, että sen erillinen tal- teenotto ei ole kannattavaa. Puupolttoainetta voidaan tuottaa ensiharvennuksista kilpailukykyisesti vain integroiduilla menetelmillä. Tavoitteena on ratio- nalisoida korjuutyötä ja parantaa sen tuottavuutta niin, että teollisuuden ai- nespuun tuotantokustannukset pysyvät vaihtoehtoisten kuitupuumenetelmien tasolla ja energijakeella päästään tavoitekustannuksiin.

Kun erilaiset tuotantoketjut sisältävät selvästi toisistaan poikkeavia proses- sointimenetelmiä - rumpukuorinta, ketjukarsinta ja MASSAHAKE-mene- telmä - niillä saadaan erilaatuisia tuotteita, joiden ominaisuuksilla on merki- tystä menetelmien kilpailukyvyille. Integroiduissa menetelmissä pyritään saa- maan talteen paljon energijaetta. Siihen päästään, jos runkopuu otetaan pie- neen läpimittaan tai jopa kokonaan. Kun puuaineen ominaisuudet ovat var- sinkin männyllä latvassa selluntuotannon kannalta huonommat kuin rungon keskellä ja tyvessä, tuotantoketjujen vertailut tulisi ulottaa sellunvalmistuk- seen asti. Männyllä sellaisiin vertailuihin on pyritty sekä käytännön kokein että laskennallisesti. Useimmiten vertailut on kuitenkin voitu ulottaa vain selluhakkeen ja energijakeen tuotantoon.

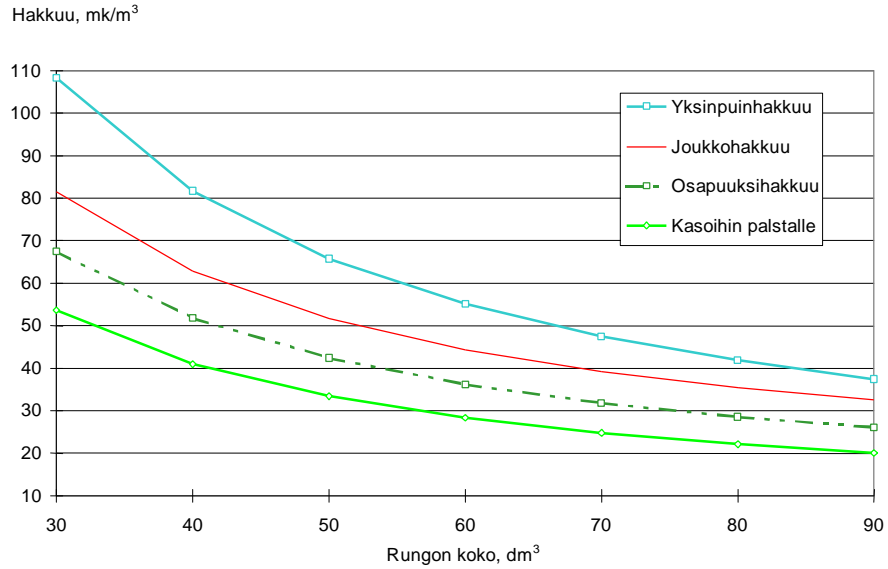
Integroitujen tuotantoketjujen vertailun periaate on, että selluhakkeen (tai yleensä teollisuuden ainespuun) tuotantokustannukset eivät saa niissä muo- dostua sen suuremmiksi, kuin ne ovat vertailuna olevissa kuitupuumenetel- missä. Kun vertailu ulotetaan sellunvalmistukseen, vastaava vertailuperusta on sellun tuotantokustannukset.

3.3 Tuotantokustannusten perusteet

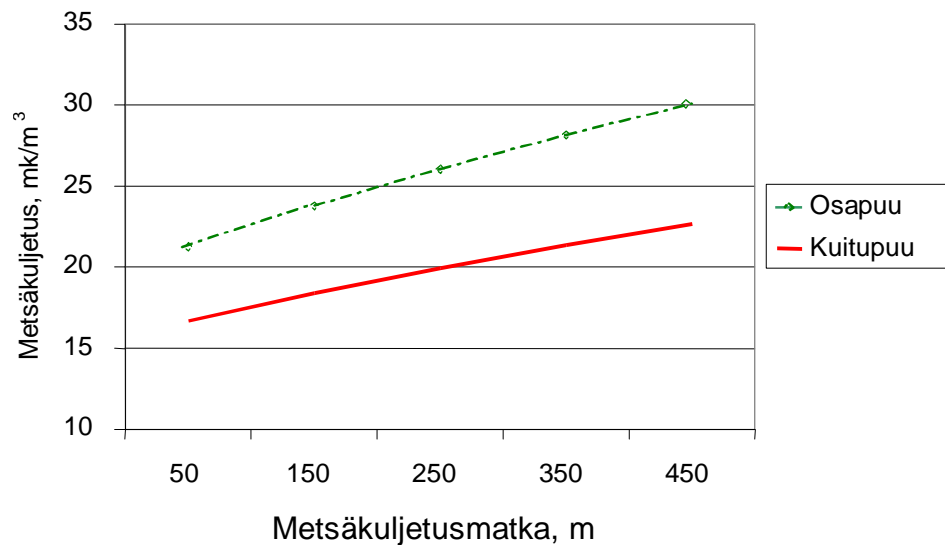
Tuotantokustannukset on laskettu ilman arvonlisäveroa lähtökohtana keskimääräiset puunhankintaolosuhteet. Työaika on laskettu 10 kuukauden kaksivuorotyön mukaan ja tuotantoyksiköiden käyttöaika on laskettu koneille määritettyjen tyypillisten käyttöasteiden mukaan. Joidenkin tuotantoyksiköiden osalta esitetään erikseen olosuhderiippuvuuksia. Tuotantokustannusten laskennassa on käytetty Metsätehossa laadittuja puunkorjuun ja puutavaran kuljetuksen laskentasovelluksia, jotka käsittävät sekä konekustannusten että työehtosopimusten mukaisten palkkakustannusten laskennan. Myös palstahaketukseen ja ketjukarsinta-rumpukuorintaan on kehitetty omat laskentasovelluksensa. Perustarkasteluissa kustannukset olivat seuraavan suuruiset:

- hakkuukone ja palstahakkuri	370	mk/h
- kuormatraktori	260	mk/h
- puutavara-auto	300	mk/h
- rumpukuorinta, mäntykuitupuu	9,00	mk/m ³
- rumpukuorinta, mäntyosapuu	14,00	mk/m ³
- rumpukuorinta, koivukuitupuu	15,00	mk/m ³
- rumpukuorinta, koivuosapuu	23,00	mk/m ³
- ketjukarsinta-rumpukuorinta, mänty	17,00	mk/m ³
- ketjukarsinta-rumpukuorinta, koivu	22,00	mk/m ³
- massahakelaitoskäsittely	23,00	mk/m ³

Puutavaran hakkuun tuottavuus ja kustannukset riippuvat ennen muuta rungon koosta. Kun sovelletaan erilaisia minimiläpimittoja, rungosta käyttöön otettava tilavuus muuttuu ja vaikuttaa siten myös hakkuukustannusten suuruuteen hiukan. Kun minimiläpimitan muutoksen vuoksi myös hakattavien runkojen minimikoko muuttuu, se vaikuttaa leimikosta korjattavien puiden lukumäärään ja kokojakaumaan, mikä puolestaan vaikuttaa korjuun tuottavuuteen ja kustannuksiin pelkän latvaläpimitan muutosta enemmän. Kuvassa 3 esitetään ensiharvennusmännyn hakkuukustannusten riippuvuus rungon koosta eri hakkuumenetelmissä. Edullisin, kasoihin palstalle -menetelmä tarkoittaa keräilykaatoa palstahaketusta varten. Kuvassa kustannukset esitetään vertailukelpoisesti koko runkotilavuutta kohti. Kuten edellä esitettiin, rungon käyttöosan tilavuus riippuu minimiläpimitasta.



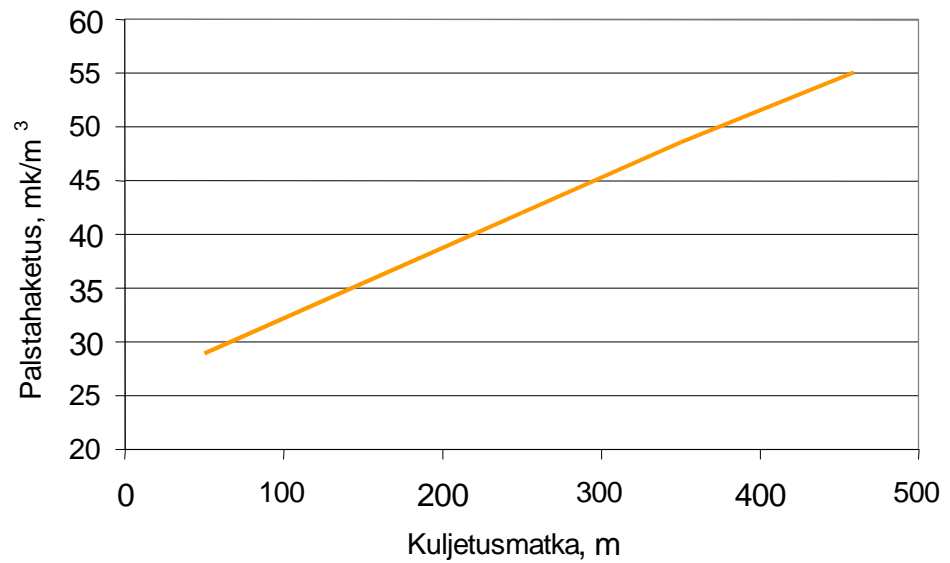
Kuva 3. Ensiharvennuskustannukset rungon koon suhteen.



Kuva 4. Mäntykuitupuun ja -osapuun kuljetuskustannusten vertailu.

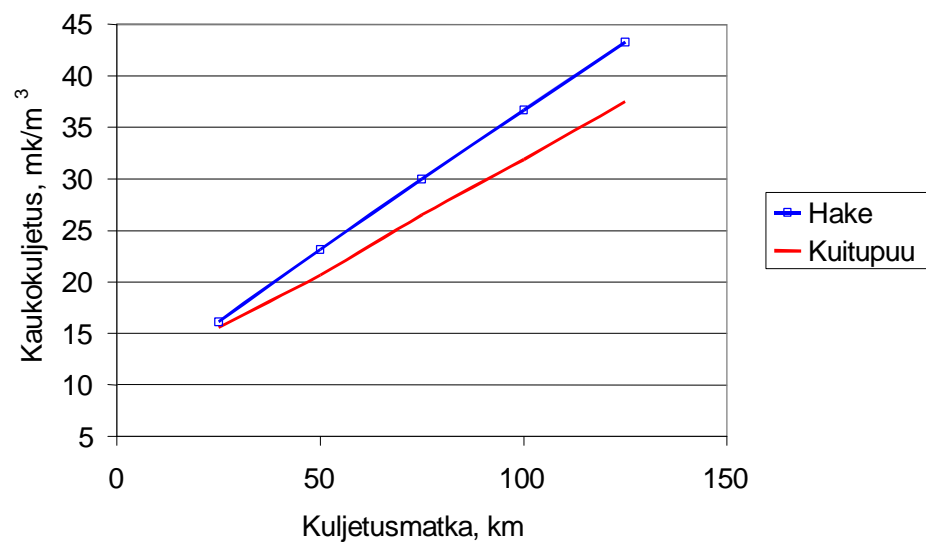
Metsäkuljetuksen tuottavuustaso riippuu puutavaralajista ja kuorman koosta, ja kuljetus tavataan esittää matkan suhteen (kuva 4). Kun mäntyleimikolla kertymä oli 50 m³/ha ja kuormakoot kuitupuulla 11,6 ja osapuulla 8,0 m³, osapuun metsäkuljetus oli noin 30 % kuitupuun kuljetusta kalliimpaa.

Ensiharvennuspuun palstahaketusta Chipset-hakkurilla on tutkittu sekä Suomessa että Ruotsissa. Tutkimuksissa on saatu melko suuria tuottavuuksia (kuva 5), vaikka kone on vielä kehittyvä.



Kuva 5. Palstahaketuksen kustannukset kuljetusmatkan mukaan.

Kaukokuljetuskustannukset 100 kilometrin matkalla on kuitupuulla noin 32 mk ja hakkeella 37 mk/m³ (kuva 6). Osapuun kuljetus on saman hintaista kuin hakkeen kuljetus.



Kuva 6. Kuitupuun ja hakkeen kaukokuljetuskustannukset.

3.4 Tutkimusohjelmassa saavutettuja tuloksia

3.4.1 Ensiharvennusten puupolttoainepotentiaali

Kokonaispotentiaali

Valtakunnan metsien inventointitietojen perusteella ensiharvennuksia tulisi tehdä vuosittain yli 200 000 hehtaarin alalla. Sitä vastaava runkopuun ja latvusmassan kertymä on 13 miljoonan kiintokuutiometrin luokkaa. Kun teollisuuden ainespuun minimimitat täyttävän kuitupuun määrä on noin 5,7 milj. kuutiota, energiapuupotentiaaliksi jää 7 miljoonaa kuutiota.

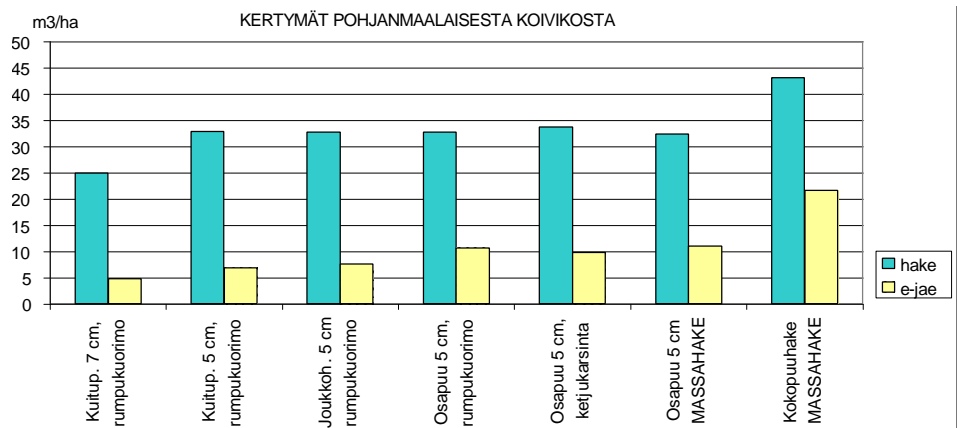
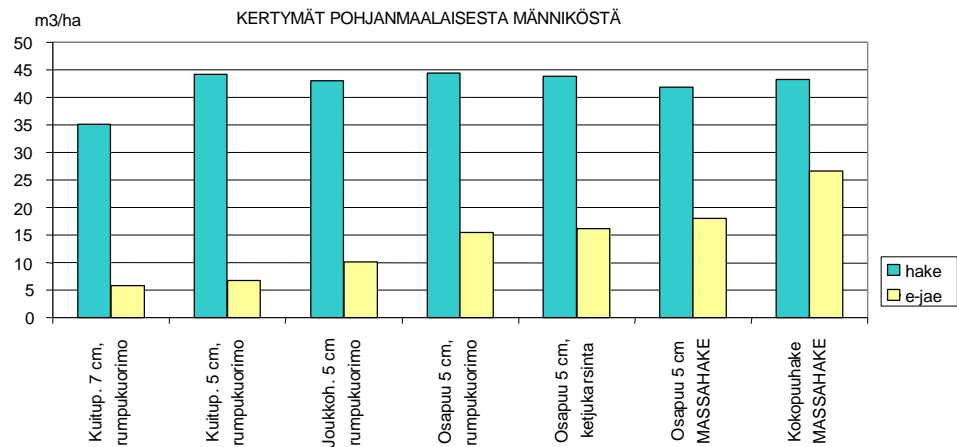
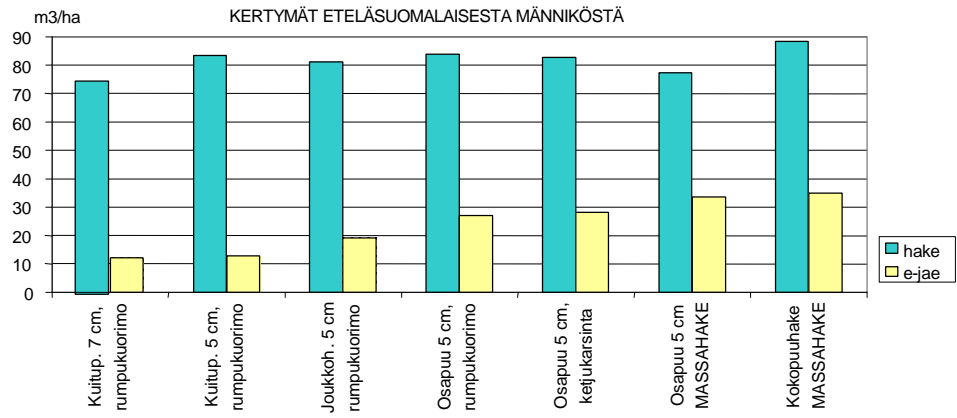
Koska kasvava puusto tarvitsee ja pystyy hyödyntämään hakkuutähteistä vapautuvia ravinteita, latvusmassaa ei pitäisi korjata kokonaan eikä kaikkein karuimmilta kasvupaikoilta lainkaan. Vaikeakulkuinen maasto rajoittaa jossain määrin hakkuutähteen talteenottoa ensiharvennuksistakin. Näiden vähennysten jälkeen ensiharvennusten energiapuupotentiaaliksi jää 5,1 milj. m³, mikä vastaa noin 0,9 milj. toe. Määrästä noin kolme neljäsosaa sijaitsee Etelä-Suomen alueella.

Ensiharvennusten määrä on viime vuosina jäänyt noin kolmannekseen edellä olevasta metsänhoidollisin perustein määritetystä tarpeesta. Hakkuissa vapautuvan latvahukkapuun ja latvusmassan määrä on laskelmien mukaan noin kaksi miljoonaa kuutiometriä vastaten noin 350 000 toe.

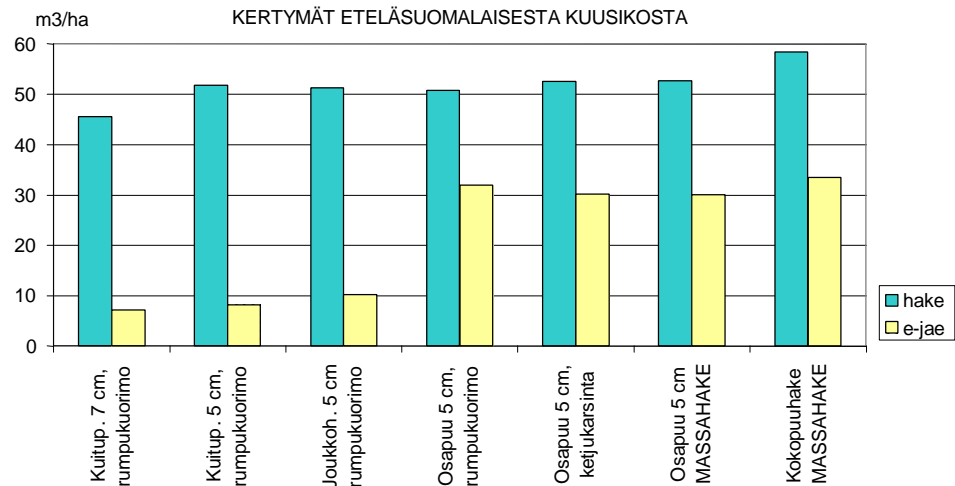
Tuotantoketjuittaiset kertymät

Eräissä projekteissa on selvitetty vaihtoehtoisilla tuotantoketjuilla saatavia energia- ja ainespuukertymiä. Tulokset osoittavat kertymien suuruusluokkaa puulajeittain ja tuotantoketjuittain. Seuraavissa kuvissa (kuvat 7 ja 8) männyn ja koivun kertymät perustuvat koelaloilta tehtyihin puustomittauksiin. Kokopuuvaihtoehdossa mukaan otettiin rinnankorkeudelta (1,3 m) kolme senttiä täyttävät puut. Siten kokopuuvaihtoehdossa runkoluku on suurempi kuin muissa tapauksissa. Kasvuoloista ja taimikonhoidon tasosta riippuen puuston rakenne vaihtelee ja vaikuttaa kertymiin. Pohjanmaalaisen männikön puut olivat pienempiä kuin eteläsuomalaisen metsikön puut. Siksi minimiläpimitan pienentäminen lisäsi suhteellisia kertymiä huomattavasti enemmän pohjanmaalaisessa metsikössä kuin eteläsuomalaisessa metsikössä. Elävän latvuksen koko oli pohjanmaalaisessa metsikössä pieni, minkä vuoksi kokopuunakorjuussa energiajakeetta kertyi merkittävästi enemmän kuin osapuunakorjuussa, jossa latvat katkaistiin viidestä sentistä.

Koivun latvus jää sulkeutuneessa metsikössä alemmissa latvuserroksissa, joiden puita harvennuksessa pääosin poistetaan, pieneksi. Siksi koivikossakin kokopuunakorjuu ja pienikokoisten puiden talteen ottaminen lisäsivät energiajakeen määrää oleellisesti. Tilanne on ominaista ojitusalueille, joissa nuoren metsän raivaus on jätetty tekemättä.



Kuva 7. Esimerkkejä integroidun korjuun kertymistä männyllä ja koivulla.



Kuva 8. Esimerkki integroidun korjuun kertymistä kuusella.

Ensiharvennuskuusikon (kuva 8) lähtötietoina oli erään puunkorjuun kehittämistutkimuksen aineisto. Siinä rungon minimipaksuus rinnankorkeudelta oli 7 cm. Bioenergian tutkimusohjelmassa kuusen integroitua korjuuta ei juuri-kaan ole tutkittu.

Edellä esitetyt ainespuun ja energiaositteiden suhteelliset kertymät verrattuina tavanomaisen taveralajimenetelmän kertymiin esitetään taulukoissa 3 ja 4. Kertymät on laskettu selluhakkeen tuotantoon asti. Selluhakkeesta on seuloitu alle 3 mm:n jae energiaositteeseen.

TAULUKKO 3. Selluhakkeen ja energiajakeen suhteelliset kertymät männällä eri tuotantoketjuissa.

Erittely	E-S, mänty		Pohj., mänty	
	hake	e-jae	hake	e-jae
Kuitup. 7 cm, rumpukuorimo	1,00	1,00	1,00	1,00
Kuitup. 5 cm, rumpukuorimo	1,11	1,03	1,26	1,16
Joukkoh. 5 cm rumpukuorimo	1,08	1,54	1,23	1,74
Osapuu 5 cm, rumpukuorimo	1,12	2,20	1,26	2,67
Osapuu 5 cm, ketjukarsinta	1,10	2,28	1,25	2,78
Osapuu 5 cm MASSAHAKE	1,03	2,72	1,19	3,10
Kokopuuhake MASSAHAKE	1,18	2,84	1,23	4,60

TAULUKKO 4. Selluhakkeen ja energiajakeen suhteelliset kertymät eri tuotantoketjuissa koivulla ja kuusella.

Erittely	Pohj., koivu		E-S, kuusi	
	hake	e-jae	hake	e-jae
Kuitup. 7 cm, rumpukuorimo	1,00	1,00	1,00	1,00
Kuitup. 5 cm, rumpukuorimo	1,32	1,46	1,14	1,14
Joukkoh. 5 cm rumpukuorimo	1,31	1,60	1,13	1,42
Osapuu 5 cm, rumpukuorimo	1,31	2,23	1,11	4,44
Osapuu 5 cm, ketjukarsinta	1,35	2,04	1,15	4,19
Osapuu 5 cm MASSAHAKE	1,30	2,31	1,16	4,18
Kokopuuhake MASSAHAKE	1,73	4,52	1,28	4,67

Ensiharvennuksesta hehtaarilta eri tuotantomenetelmillä saatavan polttojakeen energiasisältö on seuraavan suuruinen:

- kuitupuumenetelmillä 10 MWh
- osapuumenetelmillä 20 - 30 ”
- kokopuumenetelmillä 40 - 50 ”

3.4.2 Osa- ja kokopuunakorjuuseen perustuvat menetelmät

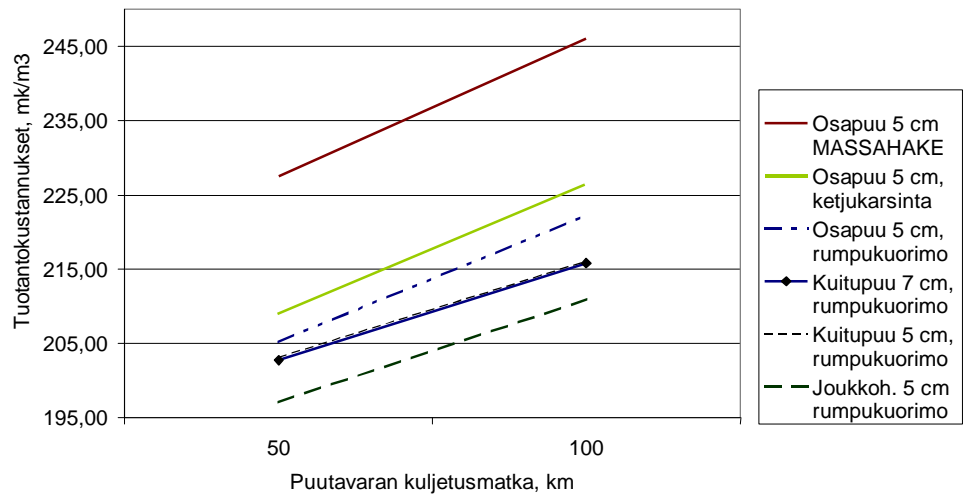
Tarkastelut perustuvat pääosin noin 10 kuukauden vuotuisen 2-vuoro-työskentelyyn. Vuotuisen työajan vaikutusta tuotantokustannuksiin tarkastellaan erikseen. Karsimattoman puutavaran kuljetuskalusto on oletettu varustetuksi sellaisella kuormatilalla, joka mahdollistaa tehokkaan kuljetustyön.

Tutkimusohjelmassa on esitetty energiajakeen hintatavoitteeksi 45 mk/MWh suurkäyttäjälle toimitettuna. Integroitujen tuotantoketjujen vertailussa se otetaan huomioon siten, että energiajakeesta lasketaan saatavan tuon hinnan mukainen hyvitys, joka otetaan huomioon selluhakkeen tuotantokustannuksia pienentävänä tekijänä. Tuotantoketjujen kilpailukykyä mitataan siten selluhakkeen tuotantokustannusten perusteella. Seuraavissa kuvissa (kuvat 9 ja 10) esitetään edellä esitetyillä leimikoilla saavutettavat tulokset. Tarkastelussa ainespuun kantohintana on 70 mk/m³ kuorellista runkopuuta.

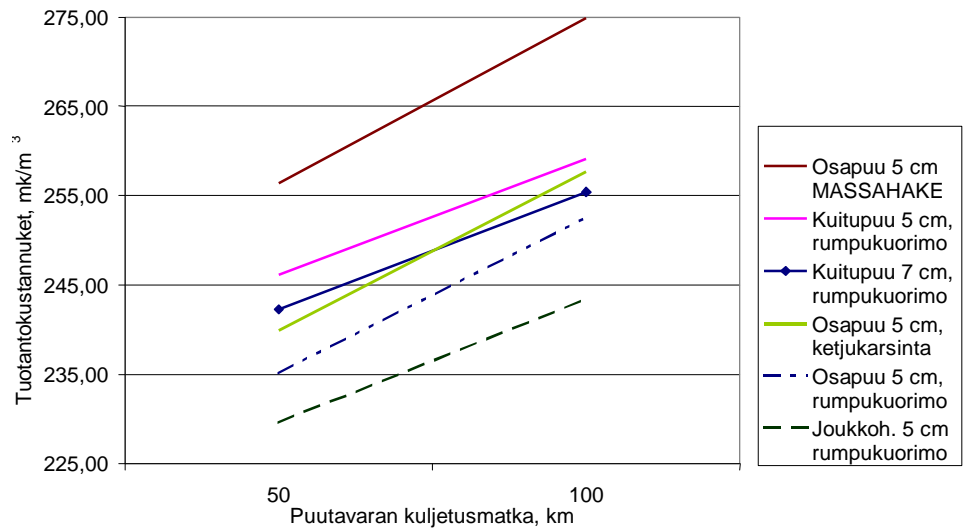
Tuotantomenetelmien kilpailukyky riippuu olennaisesti ainespuun saannosta ja korjuukustannuksista, erityisesti hakkuusta. Osapuumenetelmissä puutavaran hinta prosessointipaikalla on sama, joten menetelmien erot johtuvat saannosta ja prosessointikustannuksista. Prosessoinnin erot ovat kuitenkin pienet ja niiden osuus koko tuotantoketjun kustannuksista vain noin 10 %:n luokkaa. Niinpä MASSAHAKE-menetelmän heikko kilpailukyky johtuu selluhakkeen saannosta; se tulee saada suuremmaksi. Vaikka MASSAHAKE-menetelmässä saanto olisi saman tasoinen kuin ketjukarsinnassa, se olisi ketjukarsintaa kalliimpi, koska sen investointikustannukset ovat olennaisesti suuremmat: noin kolminkertaiset.

Rumpukuorintaan ja ketjukarsinta-pienrumpukuorintaan perustuvat osapuumenetelmät pystyvät kilpailemaan tavanomaisen kuitupuumenetelmän kanssa, kun puuston järeys on tavanomaista, noin 50 dm³/runko. Kun rungon koko on suuri, kuten eteläsuomalaisen männikön tapauksessa, noin 80 dm³/runko, tavanomainen kuitupuumenetelmä pyrkii olemaan osapuumenetelmiä edullisempi nykyisillä ainespuun ja puupolttoaineen hinnoilla.

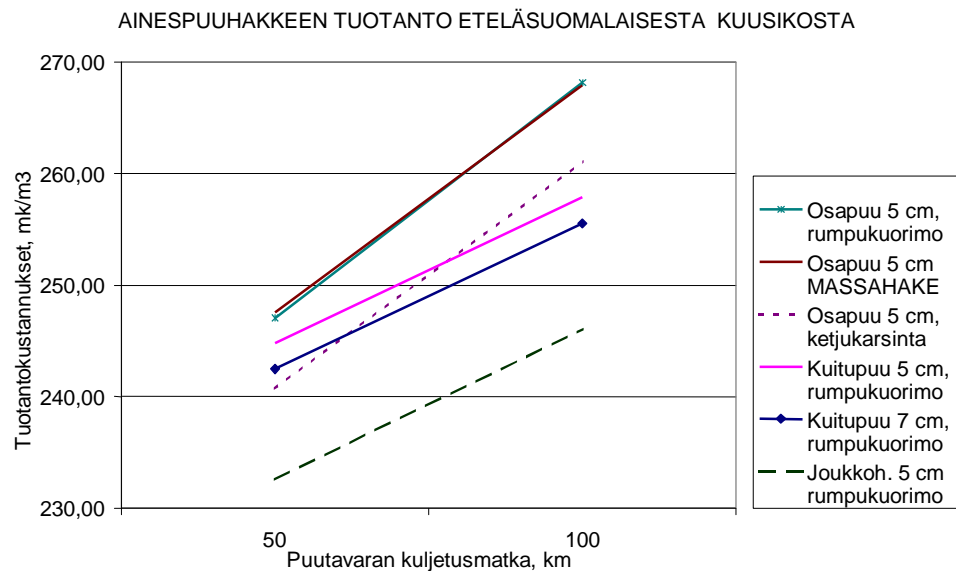
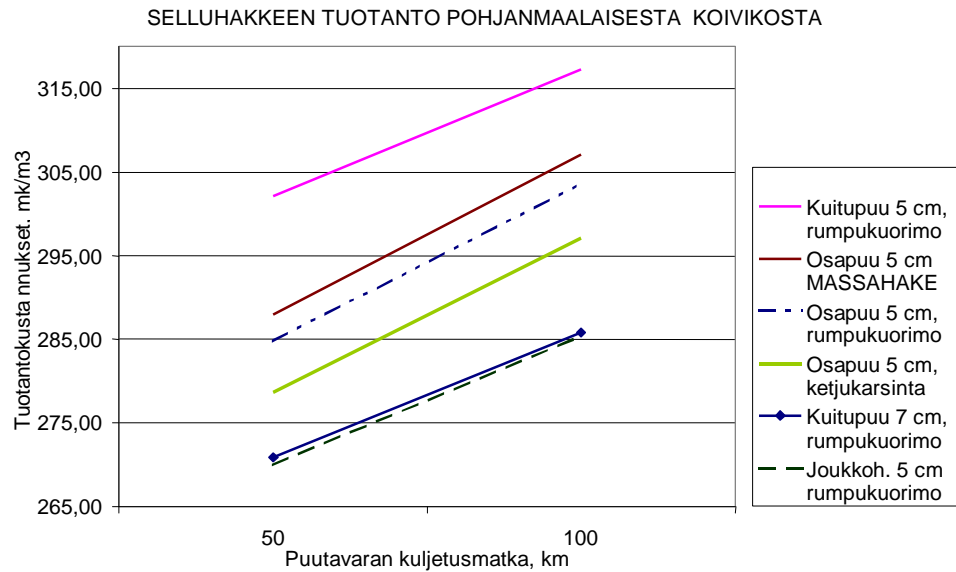
SELLUHAKKEEN TUOTANTO ETELÄSUOMALAISESTA MÄNNIKÖSTÄ



SELLUHAKKEEN TUOTANTO POHJANMAALAISESTA MÄNNIKÖSTÄ



Kuva 9. Selluhakkeen tuotantokustannukset tavaralaji- ja osapuumenetelmissä männyllä.



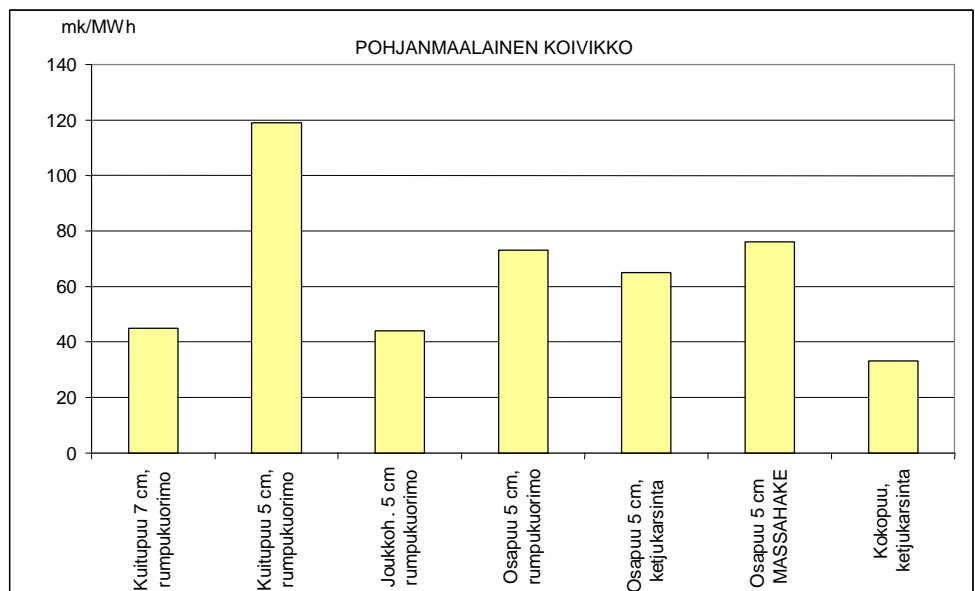
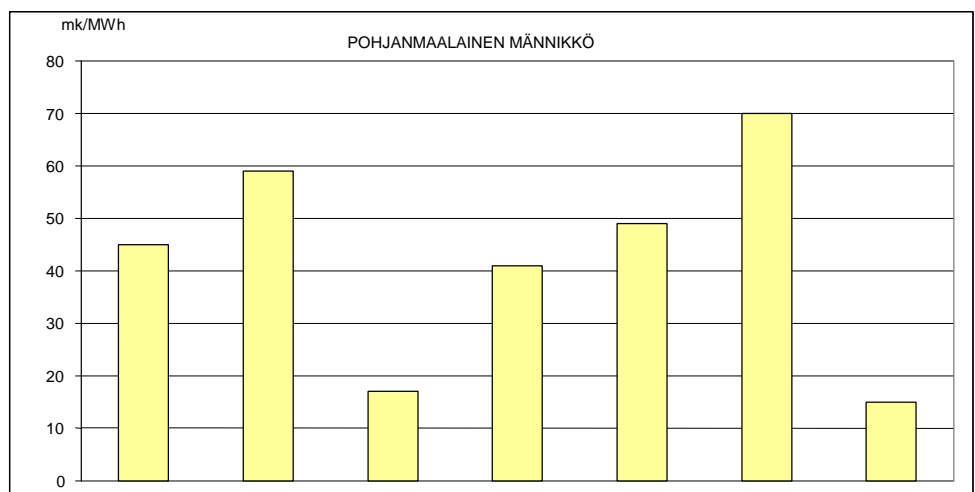
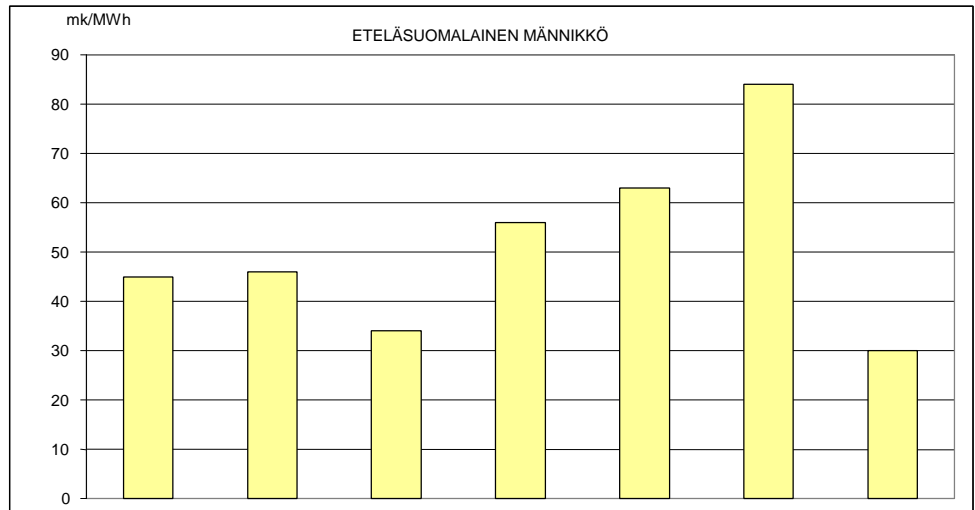
Kuva 10. Selluhakkeen tuotantokustannukset tavaralaji- ja osapuumenetelmissä koivulla ja kuusella.

Pohjanmaan koivikossa oli paljon pienikokoisia puita, keskikoko noin 48 dm³/runko. Kun läpimittavaatimusta pienennettiin, hakkuukertymään tuli runsaasti pieniä puita ja keskijäreys pieneni 35:een dm³:iin. Se suurensi hakkuukustannuksia, mikä näkyy erityisesti yksinpuinhakkuuseen perustuvassa kuitupuumenetelmässä. Kun vertailu tehdään minimiläpimittaa muuttamatta, kaikki osapuumenetelmät ovat kilpailukykyisiä yksin puin hakkuuseen perustuvalla kuitupuumenetelmälle.

Kuusen osalta tulokset ovat paljolti teoreettisia. On kuitenkin todennäköistä, että karsimattoman kuusen prosessointi onnistuu tyydyttävästi, mutta tuottavuus jää selvästi mäntyosapuuta pienemmäksi.

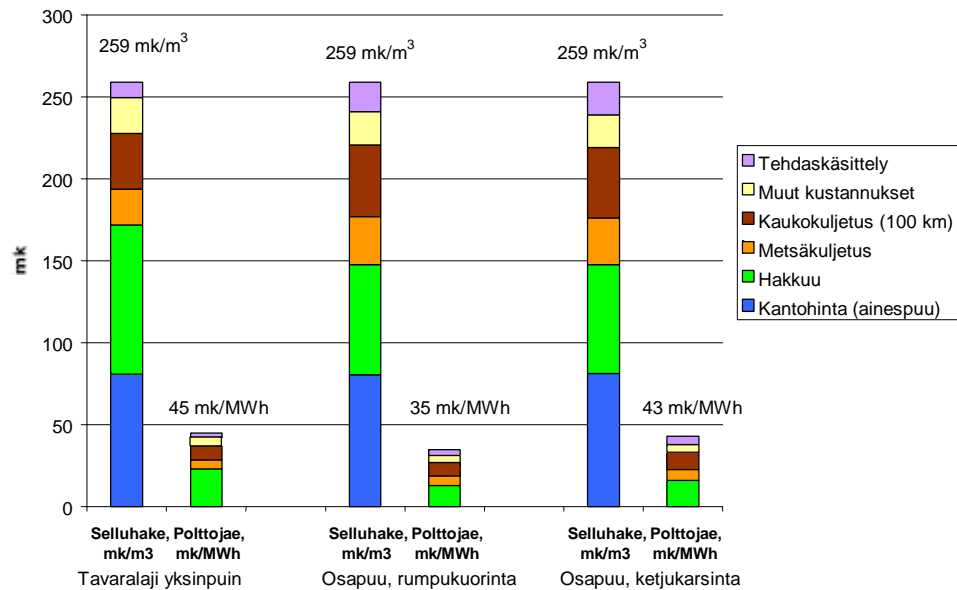
Karsimattoman puun korjuu kokonaan latvaa katkaisematta jouduttaa hakkuuvaihetta ja lisää energijakeen kertymää. Toisaalta latvakappaleet pienentävät kuljetusvaiheessa kuorman tiiviyyttä ja hidastavat energia- ja ainespuujakeen erottelua ainakin MASSAHAKE-menetelmässä ja rumpukuorinnassakin. Käytettävissä olleiden perusteiden mukaan selluhakkeen hinta karsimattomasta kokopuusta oli ketjukarsintamenetelmässä pohjanmaalaisella koivikolla noin 8 %, männiköllä 9 % ja eteläsuomalaisella männiköllä 10 % edullisempi kuin viiden sentin läpimitaan katkaistulla osapuulla. Näillä hin-tatasoilla karsimaton, kuljetuspituuksiin katkottu kokopuu ketjukarsinta-pienrumpukuorinta-asemalla käsiteltynä olisi kaikkein kilpailukykyisin me-netelmä.

Polttoaineen hinta eri tuotantoketjuilla laskettiin mänty- ja koivumetsiköille myös siten, että saadaan sama selluhakkeen hinta kuin sovellettaessa kuitu-puulle 7 cm:n minimilatvaläpimittaa. Polttojakeen hinta vaihtelee voimak-kaasti, kuten seuraavasta kuvasarjasta voidaan todeta. Tämä johtuu siitä, että kustannusmuutokset kohdistetaan polttojakeelle, jonka suhteellinen osuus koko massasta on pieni. Silloin pienikin kustannusmuutos tai jonkin perus-teen muutos voi muuttaa polttoaineen hintaa paljon. Kuten jo aiemmin kävi ilmi, joukkohakkuu on käytetyillä perusteilla edullista, mutta se lisää vain vähän polttojaetta. Kaikilla metsiköillä kokopuun talteenotto antaisi edullisen polttoaineen (kuva 11).



Kuva 11. Energiajakeen hintavertailu, kun selluhakkeen hinta asetetaan tavanomaisen kuitupuumenetelmän mukaiseksi.

Esimerkin luonteisesti tarkasteltiin myös sellu- ja energiajakeiden tuotantokustannusten jakaamaa pohjanmaalaisen ensiharvennusmännikön olosuhteissa. Selluhakkeen tuotantokustannukset olivat tavaralajimenetelmällä (min. 5 cm) 259 mk/m³. Kun vakioitiin selluhakkeen hinta eri hankintaketjuissa em. tasolle, jäi energiaositteiden hinnaksi 35 – 45 mk/MWh (kuva 12). Osapuunakorjuulla ja rumpukuorinnalla päästiin alhaisimpaan energiapuun hintaan. Korjuukustannusten osuus oli runsaat puolet polttojakeen tuotantokustannuksista.



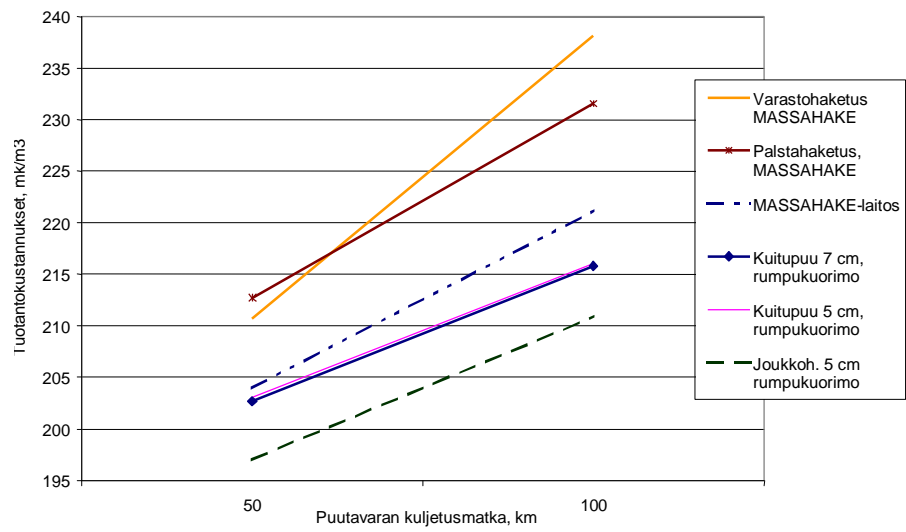
Kuva 12. Selluhakkeen ja energiaositteiden tuotantokustannukset. Pohjanmaalainen männikkö, minimilatvaläpimitta korjuussa 5 cm.

3.4.3 Kokopuuhakkeeseen perustuvat menetelmät

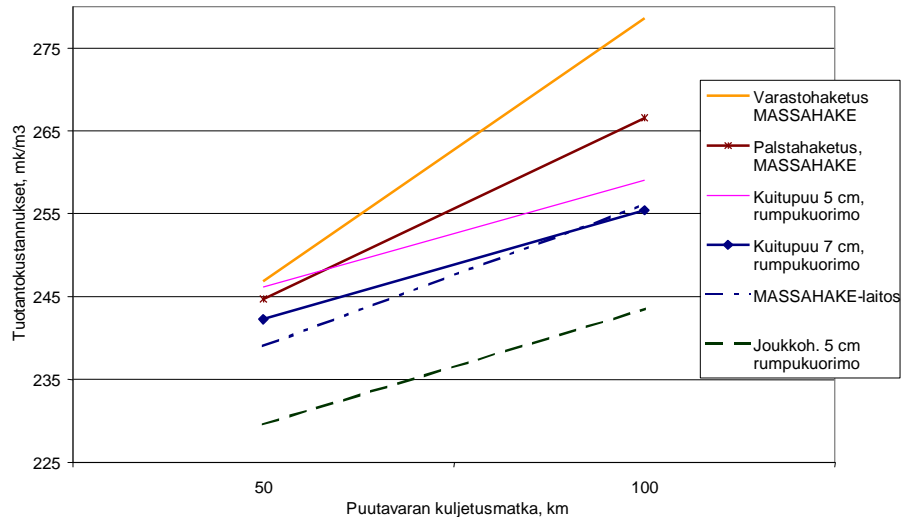
Kokopuuhaketta voidaan tuottaa palstahakkurilla tai kuljettaa karsimattomat puut välivarastolle tai käsittelyasemalle haketettaviksi. Viime mainittua vastaan edellä osapuumenetelmä, jossa puut prosessoidaan MASSAHAKE-menetelmällä. Koko latvusmassan talteenotto lisää energiajakeen ja -hyvityksen määrää johtaen männyllä 4 - 6 % ja koivulla yli 10 % parempaan tulokseen.

Metsikkökohtainen tarkastelu osoittaa (kuvat 13 ja 14), että kiinteään laitokseen perustuva tuotanto on edullisinta männyllä ja palstahaketukseen perustuva tuotanto koivulla. Keräilykaato ja palstahaketus ovat tehokkaita menetelmiä kohteissa, joissa on poistettava paljon pienikokoisia puita.

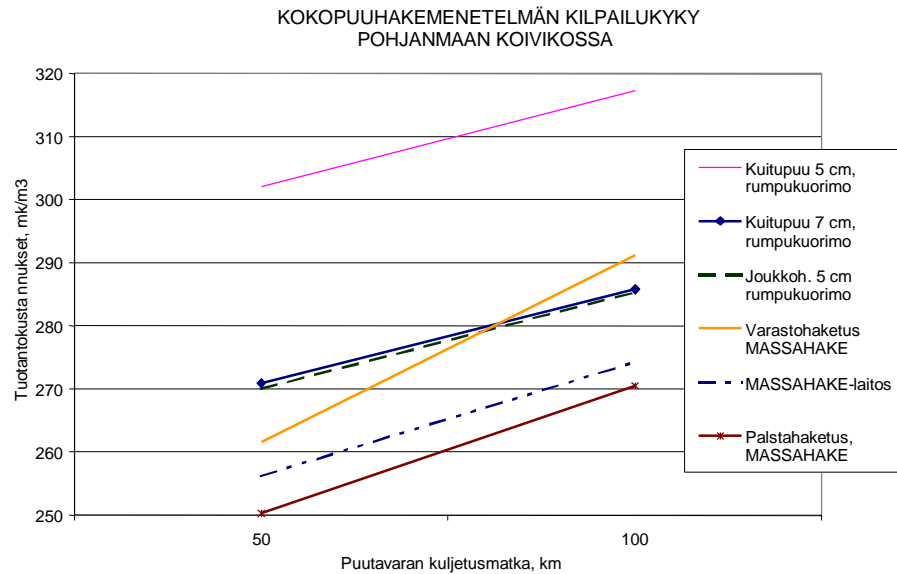
KOKOPUUHAKEMENETELMÄN KILPAILUKYKY
ETELÄSUOMALAISSA MÄNNIKÖSSÄ



KOKOPUUHAKEMENETELMÄN KILPAILUKYKY
POHJANMAAN MÄNNIKÖSSÄ



Kuva 13. Selluhakkeen tuotantokustannukset kuitupuu- ja kokopuu- menetelmillä männikössä.



Kuva 14. Selluhakkeen tuotantokustannukset kuitupuu- ja kokopuu-menetelmillä koivikossa.

3.5 Tuotantoketjujen arviointi

Ensiharvennusten energia-ainespuumenetelmät ovat vielä kokeilujen asteella. Vain osapuunakorjuuta on tehty jonkin verran käytännön mitassa, mutta senkin kalusto on ollut kehittymätöntä. Tässä tarkastelussa osapuun hankinta on laskettu hyvin tehtävään sopivalla ja varustellulla kalustolla tehtäväksi. Perusteet siihen on saatu erilaisten kokeilujen tuloksista. On kuitenkin todennäköistä, että integroitujen menetelmien kehityspotentiaali on suurempi kuin tavanomaisen kuitupuumenetelmän. Tavanomaiseen korjuuseen on juuri tullut markkinoille pienikokoinen, hankintahinnaltaan edullinen hakkuukone. Siitä ei vielä ole käytettävissä tuottavuustietoja, arvioimme sillä voitavan pienentää ensiharvennuksen hakkuukustannuksia noin 15 %, jos kone pystyy työskentelemään ympäri vuoden kuten järeät hakkuukoneet. Vaikutus selluhakkeen hintaan on vajaat 10 %.

Liikuteltavilla ketjukarsijoilla ei päästä riittävän hyvään kuorintatulokseen. Niiden käyttökustannukset ovat lisäksi suuremmat kuin kiinteällä asemalla. Kiinteä asema on sekä tuotantoteknisesti että logistisesti parempi ratkaisu. Yhdistetty ketjukarsinta-pienrumpukuorinta on osoittautunut toimivaksi. Pilotlaitoksen vuosituotanto on yli 100 000 m³. Uuden laitoksen potentiaalisesti arvioidaan yli 200 000 m³, ja tuotantokustannukset olisivat noin 20 % tässä tarkastelussa käytettyjä pienemmät. Silloin ketjukarsinta-rumpukuorinta olisi erittäin kilpailukykyinen tuotantomenetelmä.

MASSAHAKE-laitoksen laitteistokokoonpano on moninaisempi kuin ketjukarsinta-rumpukuorimon, ja sen vuoksi kalliimpi ja enemmän kehitystyötä vaativa. Prosessin jauhinkäsittelyn tarkoitus on irrottaa hakepaloista kuori, mutta samalla hakepalojakin jauhautuu pienentäen selluhakkeen saantoa.

Jauhinkäsittely aiottiin korvata ketjukarsinnalla, jolloin suuri osa runkopuun kuorestakin olisi erottunut ennen muita erotusvaiheita ja se olisi oleellisesti keventänyt optista lajittelua. Ketjukarsijalla varustettu laitos olisi ollut selvästi ketjukarsinta-rumpukuorintalaitosta kalliimpi ja tuottavuudeltaan ilmeisesti huonompi. Laitos ei saavuttaisi kustannuskilpailukykyä, ellei optisella lajittelulla olisi erityisiä etuja hakkeen laatulajitteluun. MASSAHAKE-menetelmään perustuvasta tuotantoketjusta ei ole riittäviä tutkimustietoja, joten ko. menetelmän tarkastelut ovat viitteellisiä.

CHIPSET-palstahakkuri, jonka käyttöön tarkastelu perustuu, on vielä kehitysvaiheessa. Sitä koskeva tietopohja on kuitenkin sekä suomalaisten että ulkomaisten tutkimusten ja tietojen perusteella voitu määrittää melko tarkoin. Kokopuuhakkeeseen perustuvan tuotannon käyttö riippuu kokopuuhakkeen puhdistuksesta tai käyttömahdollisuuksista.

Varsinkin tutkimusohjelman alkuvaiheessa osapuun korjuuseen etsittiin ratkaisua yhdistelmäkoneista, joilla tehdään sekä hakkuu että metsäkuljetus. Toimivia koneita ei kuitenkaan saatu nopeasti kehitettyä. Äskettäin on tullut muutamalta valmistajalta prototyyppi- tai pilotkoneita. Yhtä konetyyppiä on tutkittu karsitun puutavaran korjuussa, mutta tuloksista ei voida tehdä johtopäätöksiä yhdistelmäkoneiden kilpailukyvyistä. Ilman seikkaperäisiä tuottavuustutkimuksia yhdistelmäkoneiden mahdollisuuksia ei voida arvioida.

Leimikon ominaisuuksien vaikutus käy ilmi aiemmin esitetyistä tuotantoketjuittaisista vertailuista. Eteläsuomalainen männikkö edustaa järeäpuustoista (rungen keskikoko 80 dm³) ensiharvennusta ja pohjanmaalainen pienikokoisen puuston (rungen keskikoko 50 dm³) metsikköä. Koivikko puolestaan edustaa ojitusalueen kohdetta, jossa integroidun tuotannon voisi odottaa olevan erityisen hyvä ratkaisu sekä kustannuksellisesti että biomassan talteenoton kannalta. Järeäpuustoisessa kohteessa tavanomainen kuitupuumenetelmä on edullinen, mutta energijakeen kertymä pieni. Pohjanmaalaisessa ja sen kaltaisessa kohteessa integroidut menetelmät ovat vaihtoehtoisia ja kehityspotentiaali huomioon otettuna selvästi edullisempia kuin kuitupuumenetelmät. Ojitusalueen koivikon runsas pienpuusto lisää korjuu- ja käsittelykustannuksia, kun minimiläpimittaa pienennetään. Osapuumenetelmät ovat kuitenkin samaa minimiläpimittaa sovellettaessa selvästi tavanomaista kuitupuumenetelmää edullisempia, mutta joukkohakkuu ja rumpukuorinta tuottaisivat edullisimman selluhakkeen.

Puupolttoaineen tuotannon on perustuttava jatkuvaan, ympärivuotiseen toimintaan. Mikäli polttoaineen tuotantoa olisi vain satunnaisesti tai osan vuotta, kalustolla olisi oltava muuta työtä. Metsäkoneet ja kuljetuskalusto ovat tässä suhteessa monikäyttöisiä, mutta hakkureilla ja käsittelyasemilla ei ole vaihtoehtoisia tehtävää. Vuotuisen työajan pituuden vaikutuksen tarkastelu on osittain vain teoreettista, mutta sen suuruusluokan havainnollistamiseksi tehtiin laskelmia. Kun vuotuinen työaika muuttuu kuukauden verran eli noin 10 %, tuotantokustannukset muuttuvat seuraavasti:

- hakkuukoneilla 5 %
- kuormatraktorilla 6 - 7 %
- palstahakkurilla 7 - 8 %
- autoilla 3 - 4 %

Puupolttoaineen tuotannon kehittäminen on Ruotsissa suuntautunut palstahaketusketjuun; osapuuta siellä ei teollisuudelle hankita. Hiljattain on kuitenkin tutkittu koneellista kaatokasausta ja osapuun metsäkuljetustakin. Muun muassa tanskalaista Silvatec -keräilykaatolaitetta ja ruotsalaista joukkohakkuulaitetta (prototyyppi) kokeiltiin, mutta niillä ei päästy niin suuriin tuottavuuksiin kuin aiemmin on toteutunut suomalaisissa kokeiluissa suomalaisella joukkohakkuulaitteella. Kokeilujen tulokset ovat vahvistaneet jo aiemmin saatuja tuottavuusarvioita ja päätelmiä. Niiden tasoiset perusteet ovat jo olleet käytössä bioenergian tutkimusohjelmassa tehdyissä tarkasteluissa, joten siltä pohjalta ei nyt ole tehtävissä oleellisia tulostarkistuksia.

Ensiharvennuspuun käyttö selluteollisuudessa on ollut paitsi ominaisuuseikkojen myös muiden kuitupuulajien (sahanhake ja tukkipuiden latvakuitupuun) runsaan tarjonnan vuoksi vähäistä useita vuosia. Puunkäyttö lisääntyy ja massa- ja paperiteollisuudessa tutkitaan aktiivisesti ensiharvennuspuun ominaisuuksia tavoitteena puun teollinen hyödyntäminen. Kun energiantuotannon ympäristövaikutusten merkitys samanaikaisesti korostuu, kiinnostus integroituja tuotantomenetelmiä kohtaan kasvaa. Nopean käyttöönoton esteenä on kuitenkin teollisuuden rajalliset mahdollisuudet lisätä kiinteän polttoaineen käyttöä sellutehtaiden voimalaitoksilla ilman suuria investointeja.

4 VERTAILU OHJELMAN TAVOITTEISIIN

Taimikon harvennuksen energiapuupotentiaalin on arvioitu olevan 1,2 milj. m³ vuodessa, mikä vastaa 0,2 milj. ekvivalenttista öljytonnia (toe). Pelkän energiapuun tuotannossa kustannustehokkaimpia korjuuketjuja ovat tässä vaiheessa osittain koneellistetut menetelmät. Siirtelykaatoon ja palstahakutukseen perustuvalla menetelmällä päästään suurikäytön tavoitteen mukaiseen, 45 mk:n/MWh, kustannustasoon alle 50 km:n kuljetusmatkalla Tämä edellyttää, että nuoren metsän hoitoon ja energiapuun korjuuseen suunnattavat valtion tuet – noin 20 mk/MWh - ovat käytettävissä. Menetelmiä voidaan kuitenkin soveltaa myös pienempiin polttolaitoksiin perustuvassa toiminnassa, jossa polttohakkeen hintataso voi olla jonkin verran korkeampi kuin suurikäytössä. Nykytekniikalla korjuu kannattaa suunnata kohteisiin, joissa biomassakertymä on vähintään 35 – 40 m³/ha.

Taimikonhoidon ja ensiharvennuksen yhdistelmäkäsittely on kiinnostava menetelmävaihtoehto. Se saattaa tarjota tulevaisuudessa uuden mahdollisuuden nuorten metsien hoitoon ja käsittelyrastien purkamiseen. Menetelmä antaa samalla edellytyksiä lisäraaka-aineen tuotantoon teollisuus- ja polttokäyttöön. Tuotantoketjun tehokkuutta on kuitenkin vielä parannettava, mutta siihen on mahdollisuuksia. Menetelmän teknisen kehittämisen lisäksi tarvitaan lisätietoa

sen potentiaalisten soveltamiskohteiden määrästä sekä raivaus- ja harvennuspuun talteenoton vaikutuksista metsämaan ravinnetalouteen.

Ensiharvennusten energiapuupotentiaali on 5 miljoonaa kuutiometriä vastaten 0,9 milj. toe. Tutkimusohjelman tavoitteeseen nähden potentiaali on merkittävä. Sen realisoituminen riippuu käytännöllisesti katsoen kokonaan massateollisuuden puunkäytöstä ja mahdollisuudesta lisätä voimalaitoksillaan puupolttoaineen käyttöä.

Tutkimusohjelmassa kehitetyistä integroiduista tuotantomenetelmistä ketjukarsinta-pienrumpukuorinta näyttää toimivalta ja kilpailukykyiseltä konseptiltä. Palstahaketukseen tai ylipäätään kokopuuhaketukseen perustuvan tuotantomenetelmän ongelma on kokopuuhakkeen puhdistus. On ilmeistä, että latvusmassaa ei kannata hakettaa runkopuun joukkoon, koska se lisää ja vaikeuttaa ainespuun ja energiajakeen erottelua.

Osapuun käytön lisäys olisi periaatteessa nopeinta siten, että tehtaiden nykyisillä rumpukuorimoilla otettaisiin tavanomaisen kuitupuun joukkoon karsimatonta osapuuta. Teknisesti sitä rajoittanee eniten voimalaitosten heikko mahdollisuus lisätä kiinteän polttoaineen käyttöä.

Karsimattoman puun korjuuta ja kaukokuljetusta on kehitettävä lisää. Hyvin toimivia ja tehtävään sopivia laitteita ei ole vielä valmiina, mutta sekä Suomessa että muissa pohjoismaissa tehdyt kokeilut ja erilaiset käytössä olevat laitteet antavat hyvän mahdollisuuden nopeasti kehittää käytäntöön soveltuvia ratkaisuja.

Bioenergian tutkimusohjelma on tuottanut ratkaisumalleja ja tietoa ensiharvennuspuun integroituun hankintaan ja prosessointiin. Niiden jatkokehittäminen ja käyttöönotto edellyttävät energia- ja ainespuun käyttäjien sitoutuvaa osallistumista.