

# **Tavaralaji- ja energia-ainespuumenetelmien kilpailukyky ensiharvennuksilla**

**Antti Korpilahti**  
**Asko Poikela**

Metsätehon raportti 36  
19.12.1997

Konsortiohanke:

A. Ahlström Osakeyhtiö, Enso Oyj, Metsähallitus,  
Metsäliitto Osuuskunta, UPM-Kymmene Oyj

Asiasanat: ensiharvennus, integroitu tuotanto, kokopuunakorjuu,  
ketjukarsinta, massahakemenetelmä, osapuunakorjuu

Keywords: bioenergy, wood fuel, first thinning, whole-tree  
harvesting tree-section harvesting, chain-flail delimiting

Helsinki 1998

## SISÄLLYS

Sivu

<b>TIIVISTELMÄ</b> .....	3
<b><i>SUMMARY in English</i></b> .....	4
<b>ESIPUHE</b> .....	5
<b>1 TAUSTA</b> .....	6
<b>2 TAVOITE</b> .....	6
<b>3 TEHTÄVÄT</b> .....	7
<b>4 TOTEUTUS</b> .....	8
4.1 Puustotietojen hankinta .....	8
4.2 Koneellinen kaato-kasaus .....	9
4.3 Osapuukuorman tiivistys liukupankoilla .....	9
4.4 Muut perusteet .....	10
<b>5 TULOKSET</b> .....	14
5.1 Puustotiedot.....	14
5.1.1 Runkolukusarjat ja runkotilavuudet.....	14
5.1.2 Latvusmassat.....	18
5.2 Korjuu.....	20
5.2.1 Koneellinen kaato-kasaus ja osapuuksi valmistus.....	20
5.2.2 Liukupankkojen kokeilu.....	22
5.3 Hankintakustannukset.....	23
5.4 Selluhakkeen saanto ja tuotantokustannukset.....	25
5.4.1 Selluhakkeen saanto.....	25
5.4.2 Selluhakkeen tuotantokustannukset .....	27
5.5 Sellun tuotantokustannukset .....	29
<b>6 TARKASTELU JA PÄATELMÄT</b> .....	30
<b>VIITEKIRJALLISUUS</b> .....	32

## TIIVISTELMÄ

Tässä raportissa esitetään ensiharvennuspuun vaihtoehtoisia korjuu- ja käsittelymenetelmiä sekä verrataan niiden kilpailukykyä. Vertailut tehtiin eteläsuomalaisella mäntyleimikolla ja pohjanmaalaisilla mänty- ja koivuleimikoilla, joita koskevat tiedot hankittiin tässä projektissa. Eri tuotantoketjujen ja tehdaskäsittelyjen osalta sovellettiin Bioenergia-tutkimusohjelman projekteissa tuotettuja tietoja ja tässä projektissa tehtyjen koneellisen osa- ja kokopuunakorjuun kokeilujen tuloksia sekä niitä täydentäviä, käytännön toiminnasta saatuja tietoja.

Sekä männyllä että koivulla joukkohakkuuseen ja rumpukuorimokäsittelyyn perustuva tuotantoketju oli edullisin. Uudet käsittelymenetelmät - ketjukarsinta yhdistettynä rumpukuorintaan ja massahakemenetelmä - ovat vielä kehitysvaiheessa. Niitä koskevat tiedot eivät ole vielä kovin vakiintuneita. Menetelmillä voi olla kehityspotentiaalia huomattavasti enemmän kuin tavanomaisilla kuitupuumenetelmillä.

Männyllä tarkastelu voitiin ulottaa selluntuotantoon asti. Integroidut menetelmät olivat yleensä hieman karsitun kuitupuun menetelmiä edullisempia, koska integroidussa tuotannossa voidaan käyttää joukkokäsittelyä ja energiajakeesta saadaan hyvitystä. Käytännössä on vielä vähän mahdollisuuksia soveltaa integroituja menetelmiä.

## **SUMMARY**

*The aim of the study was to clarify the competitiveness of different harvesting chains and processing methods of first thinning wood. Great expectations have been set on integrated production of wood fuel and pulp wood. Results from other bioenergy projects were applied, and field experiments on mechanized felling-bunching and compressing of the load of tree sections during forwarding, were carried out.*

*The new processing methods, the MASSAHAKE -method and chain-flail delimiting combined with debarking by a small-scale drum, are still under development giving at moment rather unstable data for comparisons. Both in pine and birch dominant stands modern multiple tree logging gave the most favourable results when ranking on the bases of the price of pulp chips. Integrated methods were not very far and they have more potential than methods based on harvesting delimited short-wood. When compared on the bases of the production cost of pulp, integrated methods were in general the most favourable because they gave good subsidies on the form of bioenergy.*

## ESIPUHE

Tässä raportissa esitetään Bioenergia-tutkimusohjelman puupolttoaineiden tuotantotekniikan alaan kuuluneen projektin 124 - Integroitujen tuotantomenetelmien vertailu - tulokset. Tutkimuksessa vertailtiin vaihtoehtoisia puupolttoaineen ja teollisuuden ainespuun integroituja tuotantomenetelmiä ensiharvennuksissa. Vertailuissa hyödynnettiin Bioenergia-tutkimusohjelman puupolttoaineiden tuotannon muiden projektien tuloksia ja tässä tutkimuksessa hankittuja tutkimusaineistoja ja käytännön tietoja.

Projekti toteutettiin Metsäteho Oy:ssä. Projektista vastasi erikoistutkija, MML Antti Korpilahti. Tutkimukseen osallistuivat tutkija, MMM Asko Poikela ja työntutkija, mti Reima Liikkanen. Karsimattoman puun korjuuta koskevat kenttäkokeet tehtiin Enso Oy:n avustamana yhtiön omistamalla tilalla Kontiolahdella. Korjuutyöt tekivät metsäkoneyritykset Puukorku Oy ja H-P Kone Ky, ja kuormankokokeisiin osallistui Karelian Puu ja Metall Oy. Ensiharvennusleimikoiden puustotietojen hankinnassa avustivat Enso Oy ja UPM-Kymmene Oy. Tarkasteluun saatiin tietoja mm. Pohjois-Satakunnan Massahake Oy:ltä sekä Enso Oy:n ja UPM-Kymmene Oy:n sellutehtailta. Sellunvalmistuksen laskelmat tehtiin KCL:n kanssa.

Projektin maastotyöt tehtiin syksyllä 1996 ja aineistojen laskenta sekä tuotantoketjujen vertailut talvella 1997. Tulokset esitettiin Bioenergia-tutkimusohjelmalle vuosiseminaarissa maaliskuussa 1997 (Korpilahti 1997b). Tässä raportissa tulokset esitetään eräiltä osin Bioenergia-tutkimusohjelmalle raportoitua (Korpilahti 1997a) seikkaperäisemmin.

Bioenergia-tutkimusohjelma (TEKES) avusti projektia 125 000 markalla.

## 1 TAUSTA

Ensiharvennuspuun tehdashinta on suuri ennen muuta korjuuvaiheen kalleuden vuoksi. Ensiharvennusten pieni rungonkoko ja pinta-alakohtainen hakkuukertymä pienentävät korjuun tuottavuutta myöhempiin hakkuusiin nähden. Ensiharvennuspuun korjuun tehokkuutta on pyritty parantamaan joukkokäsittelyllä ja karsinnan vähentämisellä. Ainespuukertymää puolestaan on pyritty lisäämään eriyttämällä ensiharvennuspuun prosessointi muun kuitupuun käsittelystä ja soveltamalla korjuuvaiheessa kertymää lisääviä menetelmiä ja tavanomaisen rumpukuorimokäsittelyn sijasta muita prosessointimenetelmiä. Potentiaalisia menetelmiä ovat massahakemenetelmä ja ketjukarsintakuorinta. Kummastakin menetelmästä on käynnistynyt pilot-laitos; Pohjois-Satakunnan Massahake Oy Kankaanpäässä soveltaa massahakemenetelmää ja Pertti Szepaniak Oy ketjukarsinta-kuorintamenetelmää yhdistettynä pienikokoisella rummulla tehtävään kuorintaan Imatralla Enso Oy:n tehtaiden yhteydessä.

Massahakelaitoksella pystytään käsittelemään runkopuuta sekä ottamaan vastaan ja puhdistamaan kokopuuhaketta. Laitoksen puunhankintaketju voi siten perustua osapuun ohella palsta- ja välivarastohaketukseen. Ketjukarsintalaitoksella sen sijaan prosessoidaan osapuuta ja muuta runkopuuta. Prosessointi käsittää ketjukarsinnan, jossa oksien lisäksi osa kuoresta irtoaa. Lopullinen kuorinta tehdään hallitusti pienikokoisella kuorimarummulla. Haketukseen liittyy seulonta, josta ylisuuret palat palautetaan hakkuriin ja poistettavat jakeet ohjataan energiajakeeseen. Sekä massahakelaitoksen että ketjukarsintalaitoksen käynnistymiset loivat konkreettisia uusia vaihtoehtoja ensiharvennuspuun tuotantoketjujen käytännön toteutukseen ja kehittämiseen. Niiden perusteella ensiharvennuspuun käsittely voidaan selvästi eriyttää muusta puuvirrasta.

Puupolttoaineen ja teollisuuden ainespuun integroitu tuotanto ensiharvennuksesta asetettiin Bioenergia-tutkimusohjelmassa yhdeksi tärkeimmistä kehittämiskohteista. Ensiharvennuspuun korjuuta ja käsittelyä on arvioitu voitavan kehittää nimenomaan integroiduilla tuotantomenetelmillä ja siten saavuttaa kustannussäästöä. Samalla voidaan edistää metsänhoidollisesti välttämättömien ensiharvennusten tekemistä.

## 2 TAVOITE

Bioenergian-tutkimusohjelmaan on sisältynyt alusta lähtien useita integroidun tuotannon eri vaiheisiin kohdistuneita projekteja. Projekteissa on yleensä pyritty vertaamaan kehitettävää tuotantomenetelmää muihin menetelmiin kehitystyön tuloksellisuuden osoittamiseksi. Joissakin tuotantomenetelmissä

pääpaino on ollut tuotantoketjun jonkin tärkeän osavaiheen, esimerkiksi prosessoinnin, kehittämisessä. Kokonaisvaltaisia vertailuja on tehty tutkimusohjelman tarpeisiin mm. puupolttoaineiden tuotantoalueen koordinoinnin puitteissa, Metsäteho Oy:n projektissa ”Hake-, puu- ja puutavaramenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa” (Imponen ym. 1997) ja tutkimus- ja kehitystyön suuntaamista palvelevissa selvityksissä (Nousiainen ym. 1995). Eri yhteyksissä esitetyt vertailut ovat voineet osoittaa kovastikin toisistaan poikkeavia tuloksia eri tuotantomenetelmille. Vaihtelut ovat johtuneet mm. tarkastellusta materiaalista (osapuu tai kokopuu), energijakeen arvottamisesta, yleiskustannusten suuruudesta ja käsittelytavasta, pääomakustannusten käsittelytavasta, puuhäviön suuruudesta ja huomioon ottamisesta puunhankintaketjun ja -käsittelyn eri vaiheissa.

Aiemmissa vertailuissa mm. karsimattoman puun korjuuseen perustuvien menetelmien kilpailukyky saavutettiin pääosin edullisella, yhdistelmäkoneseen (Lilleberg 1994a) perustuvalla korjuuvaiheella. Ko. työvaiheen tuottavuus ja kustannukset perustuivat kuitenkin pääosin arvioihin, koska empiiriin kokeisiin perustuvia tietoja ei tuolloin saatu. Myös puunkäsittelyn prosesseja koskevat tiedot ovat olleet vähäiset, usein hankalista ja suuriin kustannuksiin johtavista tutkimusjärjestelyistä johtuen.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli parantaa em. puutteista johtuvaa tietopohjaa ja päivittää tuotantoketjuittaiset vertailut uusien tutkimustulosten ja kustannusmuutosten mukaisiksi. Tietopohjan parantaminen edellytti puunkorjuun osalta käytännön kokeiluja ja puustotietojen hankintaa metsikkömittauksilla. Kun tuotantoketjujen kilpailukykyä vertailtiin aiemmin lähinnä eri menetelmillä tuotetun selluhakkeen tuotantokustannusten perusteella, tuli tarkastelua laajentaa selluhakkeen ominaisuuksiin ja sellunvalmistukseen asti. Tavoitteena oli soveltaa selluhakkeen hinnoitteluun myös palakokojakauman mukaista hinnoittelutapaa. Tarkastelu kohdistui ensiharvennuksista saatavaan sellupuuhun, mäntyyn ja koivuun.

### **3 TEHTÄVÄT**

Projektin tehtävät olivat seuraavat:

- puustotietojen hankinta metsikkömittauksin
- koneellisen kaato-kasauksen kokeilu ja tuottavuuden tutkiminen
- karsimattoman puutavaran kuorman tiivistämisen kokeilu liukupankoilla
- muiden tarkasteluperusteiden päivitys
- vertailut tehdashinnan, selluhakkeen ja sellun tuotantokustannusten perusteella.

Käytännön leimikoilta tehtyjen puustomittausten avulla varmistettiin se, että vertailuissa käytettävät puustotiedot vastaavat todellisia olosuhteita ja edustavat käytännössä tyypillisiksi koettuja ensiharvennuspuustoja. Koneellisen kaato-kasauksen ja osapuukuorman tiivistämiskokeilujen avulla tuotettiin osapuun ja kokopuun korjuuketjujen tarkasteluihin sellaisia perustietoja, joita ei ennestään ollut käytettävissä. Muita päivitettäviä tarkasteluperusteita olivat mm. rumpukuorinta-, massahake- ja ketjukarsintamenetelmien raaka-ainevirrat, puunhankinnan ja eri käsittelyprosessien kustannukset ja sellunvalmistustarkastelun perusteet.

## 4 TOTEUTUS

### 4.1 Puustotietojen hankinta

Puustotiedot hankittiin Etelä-Suomesta ja Pohjanmaalta. Etelä-Suomen kohteeksi saatiin Enso Oy:n osoittama ensiharvennusvaiheen männikkö Ruokolahdelta. Kasvupaikka oli alueelle tyypillistä, pienipiirteisen mäkestä ja melko rehevää. Metsikkö oli uudistettu kylväen, perattu ja harvennettu taimikkovaiheessa. Kohde oli potentiaalista ketjukarsintamenetelmän käyttöaluetta.

Kun aiemmat tuotantoketjuvertailut oli tehty lähinnä eteläsuomalaisia metsikköitä kuvaavilla puustotiedoilla, pidettiin tärkeänä, että integroitujen menetelmien kilpailukykyä tutkitaan nyt myös Pohjanmaan oloissa. Pohjanmaan kohteet valittiin UPM-Kymmene Oy:n yksityismetsien leimikoista. Ensiharvennusmännikköä edustava kohde oli Haapavedeltä ja koivuvaltainen kohde Evijärveltä. Männikkö oli raivattu, koivikkoa sen sijaan ei ollut aiemmin raivattu tai harvennettu.

Metsikköihin rajattiin puuston mittausta varten suorakulmaiset koealat, joiden sivun pituus oli 30 metriä ja leveys 20 metriä. Koealoja mitattiin männiköistä Ruokolahdella kolme ja Haapavedellä kaksi sekä Evijärvellä kaksi koivikkokoealaa. Yrityksen metsätoimihenkilöt valitsivat ja merkitsivät kasvatettaviksi tarkoitetut puut. Puiden merkinnässä otettiin huomioon ajouran sijoittuminen koealan keskelle ruudun pituussuuntaan. Koealoilta mitattiin erikseen jäävä puusto sekä ajouralta poistettava ja urien välistä poistettava puusto. Jokaisen rinnankorkeudelta 30 mm täyttävän puun rinnankorkeusläpimitta mitattiin elektronisilla mittasaksilla. Tilavuuden ja muiden puustotietojen laskemiseksi valittiin yhden sentin läpimittaluokittain koepuita, joista mitattiin pituus hypsometrillä ja elävän latvuksen alkamiskorkeus hypsometrillä tai mittakepillä. Puustotiedot laskettiin Metsätehossa kehitetyllä laskentamallilla (Poikela 1996). Runkopuun tilavuuden laskenta perustuu runkokäyräyhtälöihin ja latvusmassan laskenta Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuun tuloksiin (Hakkila 1991) ja keräämiin aineistoihin.



## 4.2 Koneellinen kaato-kasaus

Koska Suomessa ei ole käytössä kaato-kasaukseen perustuvia puunhankintamenetelmiä, meillä ei myöskään ole kehittyneitä kaato-kasaukseen tarkoitettuja kaatolaitteita. Tässä tutkimuksessa kaato-kasausta kokeiltiin Outokummun Metallin Oy:n valmistamalla joukkohakkuulaitteella. Kyseinen hakkuulaite perustuu tavanomaiseen hakkuulaitteeseen, joka on varustettu keräilykaatoon ja joukkohakkuuseen käyväksi. Hakkuulaite on järeä, ja sitä käytetään yleishakkuulaitteena myös uudistushakkuissa. Pelkästään ensiharvennuksen kaato-kasaukseen soveltuisi paremmin kevyempirakenteinen keräilykaatolaite.

Kaato-kasauksekokeilussa oli sama kone ja kuljettaja, joka oli aiemmin ollut karsitun kuitupuun yksinpuin- ja joukkohakkuututkimuksissa (Lilleberg 1994b). Siten tässä tarkastelussa saavutettiin vertailukelpoisuus yksinpuinhakkuun, joukkohakkuun ja osa- ja kokopuun hakkuun osalta. Kaato-kasauksessa kokeiltiin erilaisia vaihtoehtoja ja niistä tehtiin kelloaikatutkimus. Kokeilu kesti yhden päivän, joten aineiston määrä jäi pieneksi.

**Kasoihin palstalle** -hakkuutavassa puuniput sijoitettiin palstalle tyvipää uralle päin. Tätä hakkuutapaa voidaan käyttää silloin, kun puut haketetaan palstalla Chipset-tyyppisellä palstahakurilla, joka on varustettu molemmille puolille käännettävällä hakurilla. Kiinteää hakkuria varten puuniput pitäisi pääosin sijoittaa ajouralle.

**Katkoen kasoihin** -vaihtoehdossa puuniput katkaistiin vain kerran siten, että ne pystyttiin kuljettamaan kuormatraktorilla varastolle. Puutavara voidaan silloin prosessoida varastolla ketjukarsijalla tai hakurilla. Kun osapuuajoneuvoyhdistelmän kuormatilat on rakennettu uuden, 25,55 metrin kokonaispituuden mukaisiksi, pystyttäisiin tällaista kertakatkaistua karsimatonta puutavaraa jopa kuljettamaan tehtaalle tai muulle käsittelypaikalle.

**Osapuuk valmistuksessa** puuniput katkaistiin kaukokuljetukseen sopiviksi ja lisäksi ohjeelliseen latvaläpimittaan. Osapuu valmistettiin kahdella tavalla. Toisessa tavassa keräilykaadon jälkeen puuniput ajettiin hakkuulaitteen syöttörullilla ensimmäiseen katkaisukohtaan noin viiden metrin päähän tyveltä. Toisessa tapauksessa puuniput laskettiin maahan ja koura siirrettiin nipun katkaisukohtaan.

## 4.3 Osapuukuorman tiivistys liukupankoilla

Metsäkuljetuksessa saavutettava kuormankoko vaikuttaa merkittävästi osapuunakorjuun kustannuksiin. Osapuukuorman koko on tavanomaisella keskikokoisella kuormatraktorilla ilman tiivistystä vain noin viisi kiintokuutiometriä, kun karsituilla puutavaralajeilla kuormankoko on 11 - 12 m<sup>3</sup>. Ratkaisuksi osapuukuorman suurentamiseen oli aiemmin ideoitu liukupankot (Lilleberg 1994a), mutta niitä käyttäen ei ollut tehty kuormankokotutkimuksia. Tässä

tutkimuksessa liukupankkoja kokeiltiin niiden kehittäjän kanssa. Liukupankot kiinnitettiin erilliseen runkoon ja niitä käytettiin traktorin hydraulikalla. Kokeilla liukupankoilla kuormatilan leveyttä voitiin lisätä 135 cm ja osapuu-kuormaa voitiin tiivistää supistamalla pankot hydraulisyntereillä normaalileveyteen.

Palstalla kuljetuspituuksiin katkottu osapuu kuljetettiin väliavarastolle ja kuormattiin liukupankkokuormatilaan kuormatraktorilla. Kuljetus ja siihen liittynyt kuormaus tehtiin varovasti, jotta osapuu saatiin liukupankkokuormatilaan vaurioitumatta. Liukupankkokuormatila pidettiin aluksi normaaliasentoisena ja lastattiin täyteen. Tämä osoitti kuormankoon tavanomaisella kuormatilalla. Kuorman kehysmittauksen jälkeen kuorma purettiin lähes kokonaan, kuormatila levitettiin ääriasentoon ja kuormaus tehtiin nyt välillä liukupankoilla puristaen, ja hakkuualalta haettiin kuorman täyttämiseksi tarvittava lisämäärä. Kehystilavuuksien lisäksi mitattiin tyvikappaleista rinnan- korkeusläpimitat, joiden perusteella voitiin laskea osapuun runkokohtaiset tilavuudet. Kokeilu tehtiin Enso Oy:n leimikolla Kontiolahdella.

#### 4.4 Muut perusteet

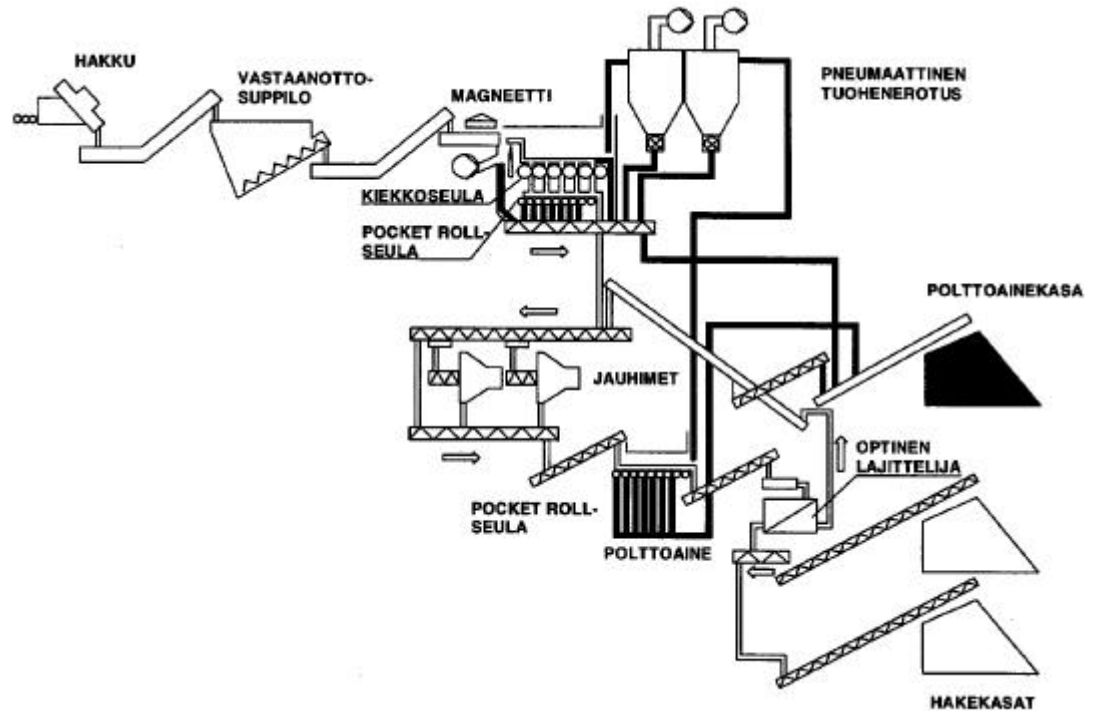
Eri tuotantomenetelmien raaka-ainevirrat pyrittiin kuvaamaan viimeisimpien tutkimustulosten mukaan. Kuorettoman puuaineen hävikki prosessoinnissa ja tuotetun hakkeen palakokojakaumasta laskettava seulontahävikki määritettiin erikseen. Kun käytännössä selluhakkeesta useimmiten seulotaan erilleen vain purujae (alle 3 mm), sovellettiin sitä tuotantomenetelmien vertailuissa. Kuorettoman puuaineen kokonaishävikki eri tuotantoketjuissa esitetään tulosten yhteydessä kohdassa Selluhakkeen saanto ja tuotantokustannukset sivulla 27.

Rumpukuorinnan hävikkejä männyllä on viimeksi tutkittu Metsäntutkimuslaitoksen projektissa (Hakkila ym. 1995). Tutkimuksesta saatiin tulokset yksinpuin- ja joukkohakatulle kuitupuulle. Osapuun hävikkejä ei ole äskettäin tutkittu, ja aiemmat tiedot vaihtelevat paljon. Osa kokeista on niin vanhoja, että puunhankinta on perustunut lyhyen kuitupuun korjuuseen ja ristikkäiskuorintaan rumpukuorinnassa. Tässä tutkimuksessa osapuulle käytettiin samaa hävikkiä kuin yksinpuin hakatulle kuitupuulle, koska sen tasoinen tai jopa parempi tulos oli saatu nykytekniikkaa ja -puunhankintaa vastaavassa käytännön kokeessa. Koivun rumpukuorintahävikkiä ei ole tutkittu, ja siksi koivulle käytettiin käytännön toiminnasta ja kokeista johdettuja arvoja.

Ketjukarsinta-rumpukuorintalaitoksen tutkimuksissa 1996 todettiin, että laitteiston käyttönopeudet ja säädöt eivät olleet hyvään tulokseen pääsemiseksi oikeita (Rieppo ym. 1997). Tutkimustulosten ja niistä tehtyjen johto-

päättösten perusteella prosessointihävikiksi kuorellisesta runkopuusta määritettiin mäntyosapuulla 5 cm:n minimilatvaläpimitalla 4 % ja 7 cm:n läpimitalla 3 %. Koivulla hävikit asetettiin puoli prosenttiyksikköä pienemmiksi.

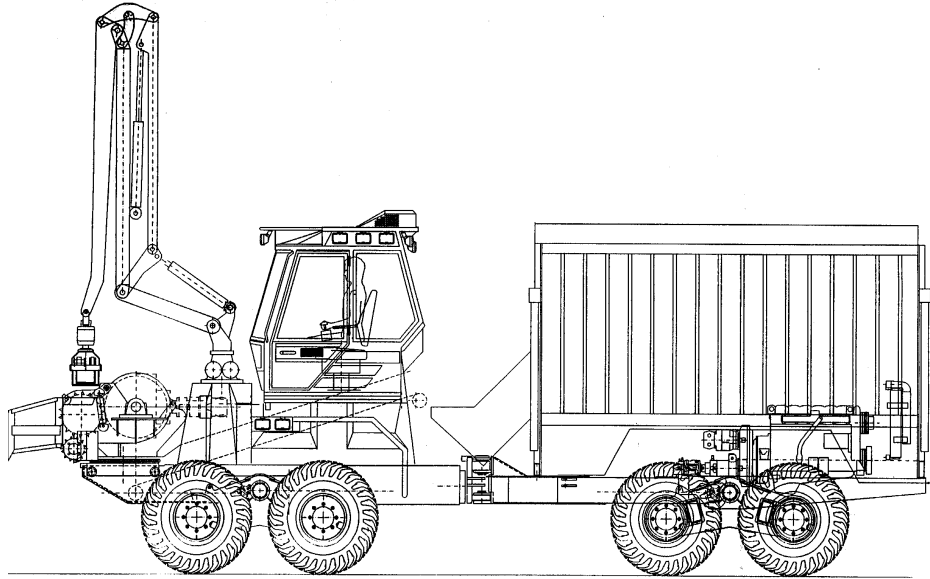
Massahakelaitoksen tuotantoprosessi käsittää puutavaran haketuksen tai hakkeen vastaanoton, mekaanisia seulontoja, kevytjakeiden pneumaattisen erotuksen, jauhinkäsittelyn kuoren irrottamiseksi hakepaloista sekä lopuksi optisen erottelun (kuva 1).



**Kuva 1.** Massahakemenetelmän prosessikaavio.

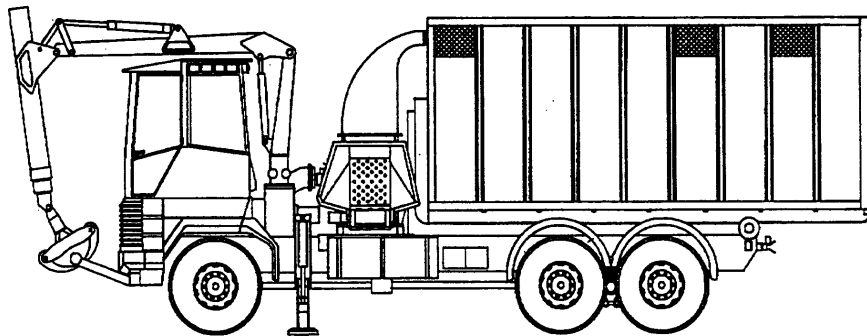
Massahakemenetelmän tarkastelussa lähtökohtana oli männyllä 70 %:n ja koivulla 75 %:n saanto hyväksyttävää selluhaketta prosessiin syötetyn osapuun tilavuudesta, kun minimilatvaläpimita oli 5 cm.

Palstahaketuksen laskentaperusteina sovellettiin Metsätehon (Poikela ja Rieppo 1995) ja SkogForskin (Thor 1996) julkaisemia tuloksia Chipsethakeharvesterista (kuva 2).



**Kuva 2.** CHIPSET-hakeharvesterissa hake siirretään hakkurilta ohjaimon alitse hihnakuuljettimella ja pakataan ruuvikuljettimella konttiin.

Kokopuiden yhdistettyä välivarastollahaketusta ja hakkeen kuljetusta tarkasteltiin MOHA-SISU-hakkurivaihtokonttiautoon perustuvana tuotantomenetelmänä. Laskentaperusteina käytettiin Hakkilan ym. (1996) julkaisemia ja omistajan antamia tietoja sekä puutavara-auton tuottavuus- ja kustannusperusteita.



**Kuva 3.** MOHA-SISU-hakkurikonttiauto voi hakkurilla varustettuna vetää lyhyttä perävaunua ja kuljettaa siten kahden kontin kuorman.

Tuotantokustannusten laskennassa käytettiin seuraavia arvonlisäverottomia tunti- ja yksikkökustannuksia:

- hakkuukone ja palstahakkuri	370	mk/h
- kuormatraktori	260	–"
- hakkuri- ja kuljetusauto (50 km)	330	–"
- puutavara-auto (50 km)	300	–"
- rumpukuorinta, mäntykuitupuu	9,00	mk/m <sup>3</sup>
- rumpukuorinta, mäntyosapuu	14,00	–"
- rumpukuorinta, koivukuitupuu	15,00	–"
- rumpukuorinta, koivuosapuu	23,00	–"
- höyryn hinta sellulaskennassa	16,00	mk/GJ
- hyvitys energijakeesta	35,00 ja 45,00	mk/MWh

Männylle tehtiin sellun tuotantokustannuksiin asti yltänyt tarkastelu. Tuotantoprosessin energiahyvitys laskettiin höyryn tuotantohinnalla 16 mk/GJ eli noin 58 mk/MWh. Se määritettiin polttoaineen hinnan ja kattilan hyötysuhteen perusteella, kun kivihiihilpolttoaineen hinta oli 353 mk/t. Vuoden 1997 alkupuolella kivihiihilpolttoaineen käyttäjähinta rannikolla oli 58 - 60 mk/MWh ilman arvonlisäveroa (Energiakatsaus 3/1997). Kun käytetään puupolttoainetta, sen hinnan käyttöpaikalle toimitettuna tulee olla noin 45 mk/MWh, jotta päästään em. tavalla määritettävään höyryn hintaan.

Sellutarkastelussa pääosa energiahyvityksestä saadaan mustalipeästä. Sen arvoa ei tässä tarkastelussa muuteltu. Sen sijaan kiinteästä polttojakeesta saatava energiahyvitys laskettiin kahdella hinnalla. Toinen oli tutkimusohjelmassa esitetty tavoitehintaa 45 mk/MWh, mikä siis vastasi edellä esitettyä höyryn hintaa. Toinen hyvityshinta oli selvästi pienempi, 35 mk/MWh. Pienempi hyvityshinta vastaa paremmin tilanteita, joissa integroidun tuotannon puupolttoaine kilpailee vaihtoehtoisten kiinteiden polttoaineiden, kuten turpeen, kanssa. Myös tilanteessa, jossa energiajakeetta ei voida hyödyntää prosessointipaikalla, tuotantoketjun kustannuskilpailukyky heikkenee energijakeen käyttöpaikalle kuljetuksen vuoksi.

## 5 TULOKSET

### 5.1 Puustotiedot

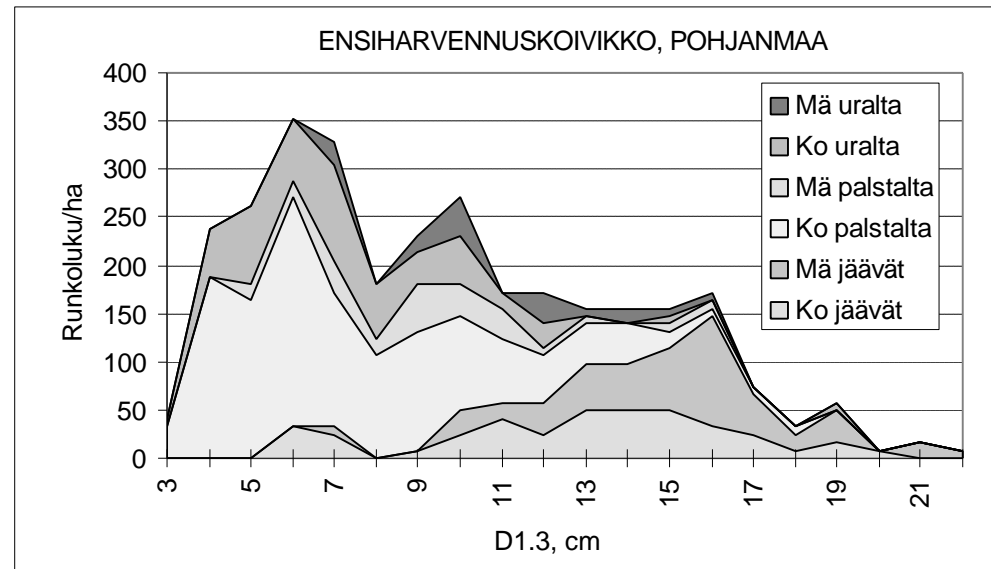
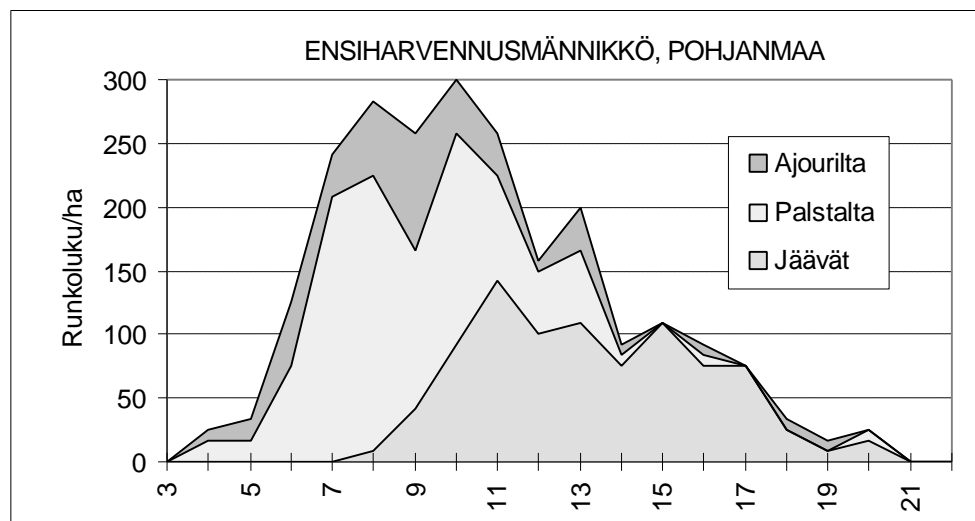
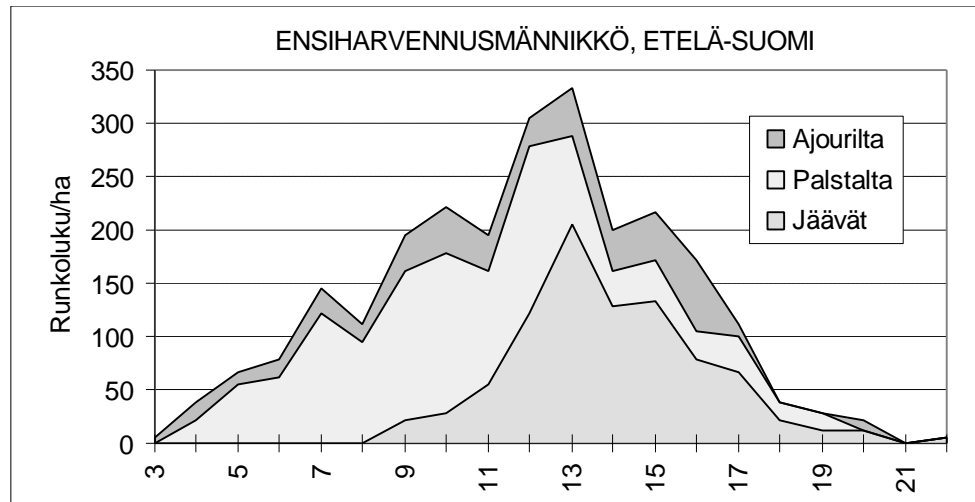
#### 5.1.1 Runkolukusarjat ja runkotilavuudet

Koeloilta mitattuihin runkolukusarjoihin perustuvat puuston kuvaukset osoittavat, että eteläsuomalaisen männikön puusto painottui suurempiin läpimittaluokkiin kuin pohjanmaalaisen kasvupaikan männikkö. Parempien kasvupaikka- ja muiden kasvuolosuhteiden vuoksi eteläsuomalaisen männikön puusto oli merkittävästi järeämpää kuin pohjanmaalaisen metsikön puusto, vaikka puuston tiheys oli leimikoilla samansuuruinen (kuva 4).

Koivikossa puuston kokovaihtelu oli suuri, koska metsikköä ei ollut raivattu parikymmentä vuotta sitten tehdyn ojituksenkaan yhteydessä. Raivaamattomuudesta johtuva pienten runkojen määrä oli suuri. Koivikossa oli sekapuuna mäntyä, mikä on tyypillistä alueen metsiköille. Puuston kokonaistiheys oli yli 3 000 runkoa/ha, ja siitä mäntyrunkojen osuus oli 860 kpl/ha. Koivikon osalta tässä tuotantomenetelmien vertailussa analyysi kohdistettiin vain koivuun.

Runkojakaumakuvista voidaan havaita myös se, että harvennuksessa poistetaan huomattavan paljon pienikokoisia puita ja kasvamaan jätettävien puiden runkolukusarja painottuu järeämpiin puihin.

Karsitun kuitupuun ja karsimattoman osapuun pölkyn minimipituutena oli 2,5 m ja minimilatväläpimittoina tarkastelluissa tapauksissa 5 ja 7 cm. Kokopuunakorjuun vaihtoehtoisissa puolestaan käytettiin miniminä 30 mm:n rinnankorkeusläpimittaa. Siksi eri vaihtoehtoisissa poistettavien runkojen lukumäärä ja runkojen keskijäreydet - rinnankorkeusläpimitta  $D_{1,3}$  ja runkopuun tilavuuksien keskiarvo  $\text{dm}^3/\text{runko}$  - vaihtelevat korjuussa sovellettavan minimilatväläpimitan mukaan (taulukko 1, s. 16). Poistettavan puuston latvuksen määrä ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) osoittaa osa- ja kokopuumenetelmillä ainespuun mukana korjattavaa latvusmassaa.



**Kuva 4.** Leimikoiden runkolukusarjat eriteltyinä ajourilta poistettaviin, palstalta urien väliltä poistettaviin sekä kasvamaan jätettäviin.

TAULUKKO 1 Mittauksiin perustuvat leimikoiden puustotiedot

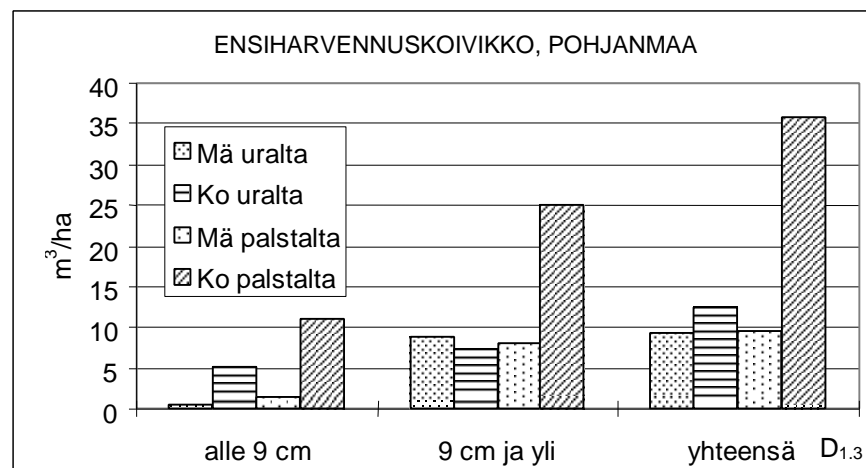
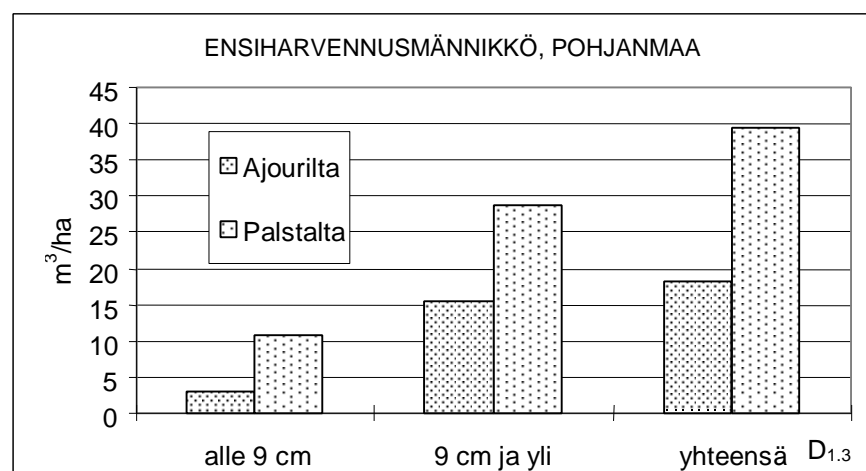
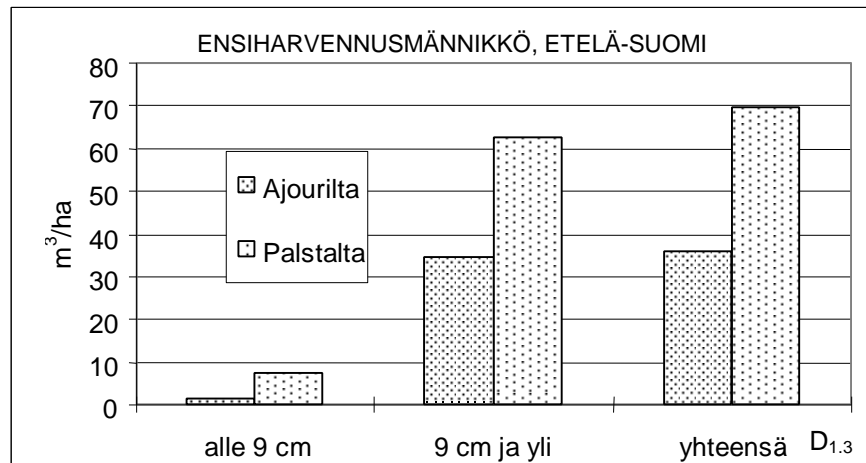
Leimikko	Tiheys, runkoa/ha	D <sub>1.3</sub> , cm	Järeys, dm <sup>3</sup> /runko	Runkopuu, m <sup>3</sup> /ha	Latvus, m <sup>3</sup> /ha
Ensiharvennusmänty, Etelä-Suomi					
Kokonaispuusto	2 489	11,8	80,6	200,7	33,9
Poistettava puusto					
latvalpm. 7 cm	1 267	12,0	79,5	90,6	4,2
latvalpm. 5 cm	1 489	11,2	70,7	101,4	9,4
kokopuuna	1 600	10,7	66,3	106,1	17,1
Ensiharvennusmänty, Pohjanmaa					
Kokonaispuusto	2 325	10,6	59,8	139,1	31,4
Poistettava puusto					
latvalpm. 7 cm	1 025	10,1	50,0	42,4	2,5
latvalpm. 5 cm	1 392	9,2	41,2	53,7	6,2
kokopuuna	1 450	9,0	39,8	57,7	12,3
Ensiharvennuskoivu, Pohjanmaa					
Kokonaispuusto	2 221	8,5	35,1	78,0	12,9
Poistettava puusto					
latvalpm. 7 cm	762	10,5	47,9	30,2	1,4
latvalpm. 5 cm	1 303	8,8	34,5	40,5	3,0
kokopuuna	1 828	7,6	26,5	48,5	7,2

Etelä-Suomessa puuston keskiläpimittaa vastaava pituus oli noin 13 metriä, kun se Pohjanmaan leimikossa oli 11 metriä. Hakkuukertymät olivatkin eteläsuomalaisessa ensiharvennusmännikössä kaksinkertaiset pohjanmaalaisiin olosuhteisiin verrattuna.

Koivikossa keskiläpimittaa vastaava pituus oli 10,5 metriä. Koivupuun poistuma jäi pienen runkokoon vuoksi selvästi pienemmäksi kuin esimerkiksi pohjanmaalaista mäntyleimikkoa edustaneessa Haapaveden männikössä. Kun koivikkokohteella hakkuukertymään laskettiin myös poistettavat männyt, kertymä suureni enimmillään noin 50 %, kun tarkastelussa oli 7 cm:n minimiläpimittavaihtoehto. Männyt olivat selvästi koivuja järeämpiä. Puolet männyntä saatiin ajourilta.

Ensiharvennuksessa huomattava osa hakkuukertymästä saadaan ajourilta poistettavista puista (kuva 5). Kun ajouraväli on 20 metriä, ajourien pinta-ala on noin 20 % leimikon pinta-alasta, mutta koska ajourilta poistetaan kaikki puut ja urien välistä vain pääosin kasvussa jälkeen jääneitä, kertymä urilta voi olla jopa puolet leimikon hakkuumäärästä.





**Kuva 5.** Runkopuukertymien muodostuminen erityyppisillä leimikoilla.

Pohjanmaalaisen koivuvaltaisen kohteen hakkuukertymän rakenne poikkeaa selvästi männiköiden hakkuukertymistä. Männiköissä puuston tilajärjestys oli verraten tasainen; koivikossa sen sijaan oli puuryhmiä ja aukkoisuutta. Se merkitsee, että koivikossa ajourien aukaisussa otetaan huomioon metsikön aukkoisuus sekä pyritään jättämään metsikön järeimmät ja usein samalla parhaimmat puut kasvamaan. Silloin ajourilta tulee koivikosta poistettaviksi selvästi vähemmän suurikokoisia puita kuin tasarakenteisemmista mäntyleimikoista.

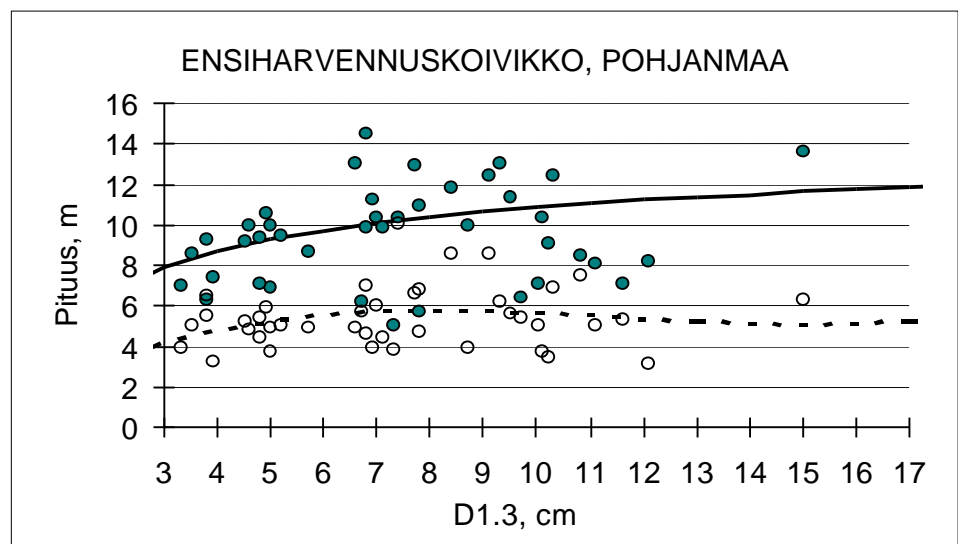
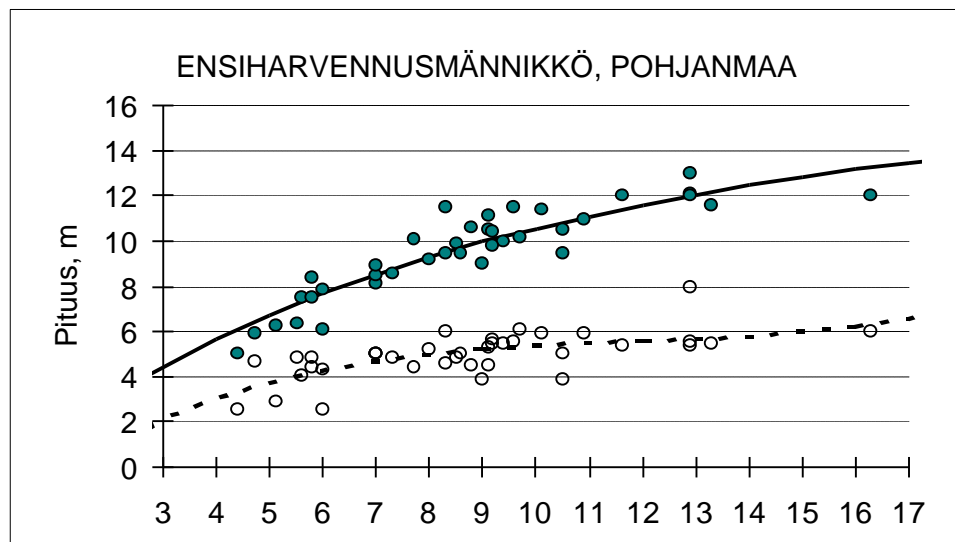
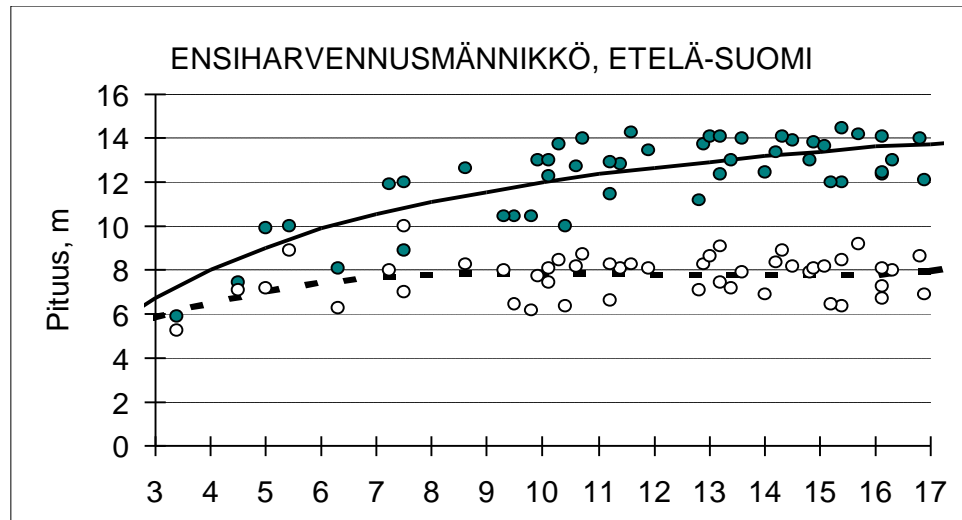
Koivikon hakkuukertymäkuvasta voidaan nähdä lisäksi kaksi muuta koivuvaltaisen ojitusalueen leimikon ominaispiirrettä. Kun harvennuksessa pyritään jättämään mäntyä, mäntypuutavaraa kertyy ajourilta yhtä paljon kuin urien väliseltä alueelta yhteensä. Koivun osalta puolestaan voidaan nähdä, että rintahallalta alle 9 cm:n puista saatava kertymä lisää merkittävästi koko hakkuukertymää. Siten minimiläpimittavaade vaikuttaa selvästi siihen, kuinka paljon raaka-ainetta koivikosta saadaan.

### **5.1.2 Latvusmassat**

Kun osapuunakorjuussa sovellettiin 7 cm:n minimilatvaläpimittaa, poistuman latvusmassan osuus kokonaispuuston latvusmassasta oli männyllä Etelä-Suomen leimikossa 12 % ja Pohjanmaalla männyllä 8 % ja koivulla 11 % (taulukko 1 s. 16). Viiden sentin minimilatvaläpimitalla latvusmassan osuudet olivat vastaavasti 28, 20 ja 23 %. Jos leimikot korjattaisiin kokopuumenetelmällä, eteläsuomalaisen männikön latvusmassasta (oksat ja neulaset) poistuisi korjuussa 50 %, pohjanmaalaisella männiköllä 39 % ja koivulla 56 %.

Kokopuunakorjuussa runkopuun ja latvusmassan yhteenlaskettu kertymä oli 7 cm:n minimilatvaläpimitan mukaiseen runkopuukertymään verrattuna eteläsuomalaisella männiköllä 1,36-kertainen, pohjanmaalaisella männiköllä 1,65- ja koivikolla 1,84-kertainen.

Kaikkien kohteiden puustot olivat tiheitä ja latvukset varsinkin männiköissä sulkeutuneita. Siitä johtuen elävän latvuksen alkamiskorkeus oli lähes sama eri pituisillakin puilla (kuva 6).

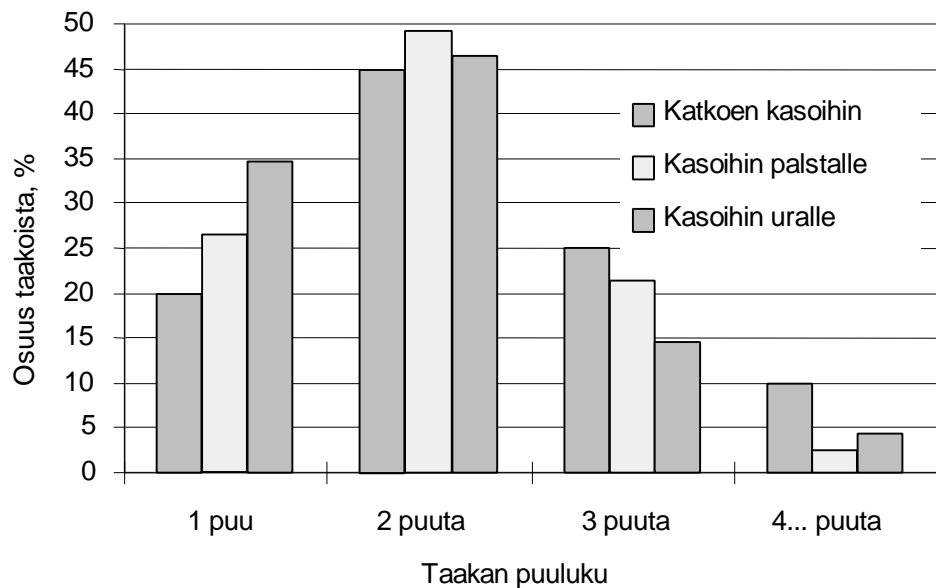


**Kuva 6.** Koepuista mitatut pituudet ja elävän latvuksen alkamiskorkeus; ylempänä pituushavainnot ja tasoitettu pituus, alempana elävän latvuksen alkamisen mittahavainnot ja tasoitettu alkamiskorkeus.

## 5.2 Korjuu

### 5.2.1 Koneellinen kaato-kasaus ja osapuiksi valmistus

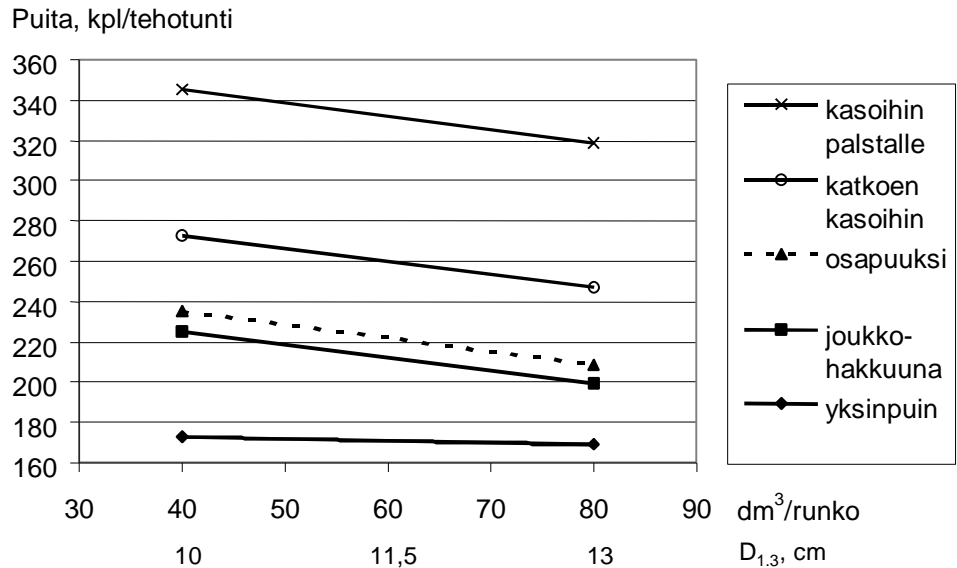
Koneellista kaato-kasausta ja osapuiksi valmistusta kokeiltiin ensiharvennumännikössä, jossa rungon keskikoko oli noin 40 dm<sup>3</sup> (D<sub>1.3</sub> lähes 10 cm ja puun pituus 10 m). Kokeilussa joukkokäsittelyaste vaihteli 65:stä 80 %:iin. Lähes puolet taakoista oli kahden puun taakkoja, mutta myös kolmen ja useamman puun taakkoja oli runsaasti, 19 - 35 % (kuva 7).



**Kuva 7.** Taakkojen jakaumat puuluvun mukaan männyn osapuiksi valmistuksessa (katkoen kasoihin) ja kaato-kasauksen kokeiluissa.

Koska kokeilua ei voitu toistaa erilaisissa leimikoissa, jouduttiin tulosten yleistyksessä turvautumaan lähinnä samankaltaisen menetelmän, joukkohakkuun, tutkimustietoihin. Keräilykaatona tehtävän kaato-kasauksen tuottavuuden oletettiin riippuvan poistettavien puiden koosta samalla tavoin kuin Lilleberg (1994) on esittänyt kuitupuun joukkohakkuusta.

Kun ensiharvennumännikön runkojen keskijäreys oli 40 dm<sup>3</sup>, koneellisen hakkuun tuottavuus vaihteli em. kokeilussa ja vertailuperusteilla yksinpuinhakkuun noin 175:stä palstallekasauksen noin 350:een runkoon tehotunnissa (kuva 8). Kun puusto järeyytyy, sen tiheys, runkoa/ha, pienenee ja joukkokäsittelynä hakattavien runkojen osuus vähenee, mikä näkyy joukkokäsittelymenetelmien tuottavuuden pienentymisenä, kun tuottavuutta kuvataan käsiteltyjen puiden lukumäärällä tuntia kohden.



**Kuva 8.** Koneellisen hakkuun, osapuuksi valmistuksen ja kokopuun kaato-kasauksen tuottavuus männikön ensiharvennuksessa.

Osapuuksi valmistuksessa puiden tai puunippujen latvat katkotaan ohjeläpimittaan. Vaikka latvan katkaisu vie aikaa vain 6 -7 cmin/taakka, kertakatkaus kuljetuspituuteen (katkoen kasoihin -vaihtoehto) johtaa selvästi parempaan tuottavuuteen.

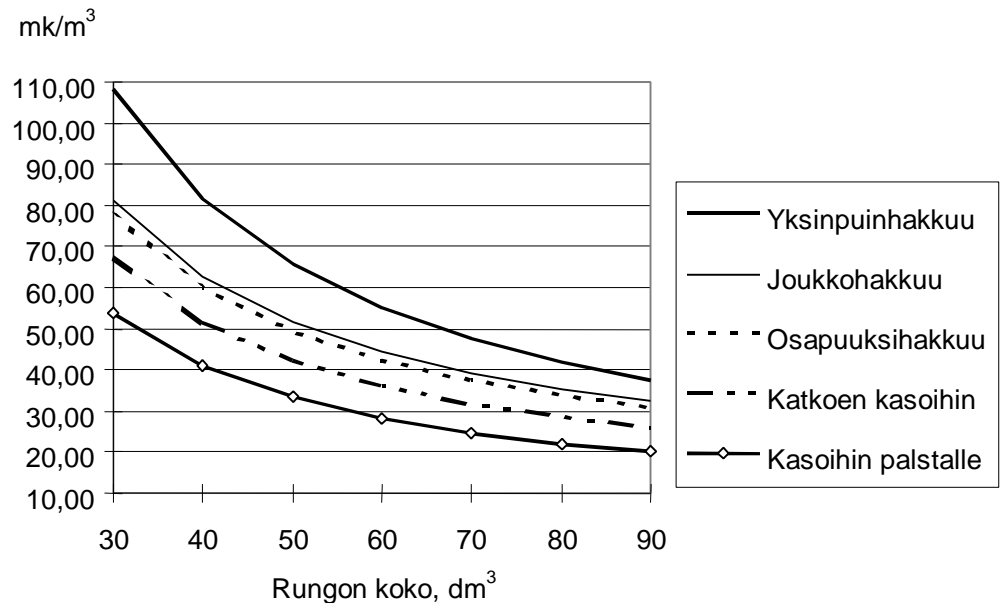
Puunipun katkaisu on nopeinta siten, että nippu ajetaan hakkuulaitteen syöttörullilla ensimmäiseen katkaisukohtaan. Kun metsikkö on sulkeutunut, puiden tyviosat ovat jo karsiutuneet ja niissä on vain vähän kuivia oksia. Latvusmassaa ei siten juurikaan menetetä, vaikka tyviosa karsiutuu osittain.

Tässä kokeilussa osapuuksi valmistus oli vähän nopeampaa kuin Lillebergin vuonna 1994 raportoima kuitupuun teko joukkohakkuuna. Vertailu perustuu kuitenkin eriaikaisiin kokeisiin, ja osapu- ja kaato-kasaukokeilun osalta aineisto oli pieni.

Koska ensiharvennukspuusto on pienikokoista, pienikin järeysmuutos vaikuttaa suhteellisen paljon runkotilavuuteen ja kertymään ja sitä kautta hakkuukustannuksiin. Mitä vähemmän puukohtainen käsittelyaika riippuu rungon koosta (yksinpuinhakkuu), sitä suurempi merkitys rungon tilavuudella on hakkuukustannuksiin.

Kuvassa 9 kustannukset on laskettu kaikissa tapauksissa koko puun kuorelta runkopuuta kohden. Kustannusten laskennassa on sovellettu puutavaran koneellisesta hakkuusta esitettyjä aika- ja seurantatutkimusten mukaisia teho/tuotantoaikamuunnoksia (Kuitto ym. 1994).

Jos hakkuukustannukset esitettäisiin minimilatvaläpimittojen mukaan talteen saatavaa tilavuutta kohden, kustannuserot tavaralajimenetelmien ja karsimattakorjuun välillä olisivat selvästi suuremmat. Tavaralaji- ja osapuumenetelmissä sovellettava minimilatvaläpimitta vaikuttaa rungon käyttöosan tilavuuteen, toisin sanoen siihen talteenotettavaan puumäärään, jolle kustannukset kohdistetaan.



**Kuva 9.** Koneellisen hakkuun, osapuuksi valmistuksen ja kokopuun kaato-kasauksen kustannukset, mk/m<sup>3</sup> runkopuuta.

### 5.2.2 Liukupankkojen kokeilu

Kokeiluilla liukupankkoilla kuormatilan leveyttä voitiin lisätä 135 cm. Kun sivupylväiden korkeus oli 203 cm, kuormatilan poikkipinta-ala oli pankkojen ollessa perusasennossa 3,8 m<sup>2</sup> ja leveimmillään 6,5 m<sup>2</sup>. Kuormatilan poikkipinta-ala voitiin siten suurentaa 2,7 m<sup>2</sup> eli 1,7-kertaiseksi. Kuormatilan kehystilavuus oli viiden metrin pituudella laskettuna perustilanteessa 18,8 m<sup>3</sup> ja suurimmillaan 32,5 m<sup>3</sup>.

Liukupankkoilla tiivistettiin kokeilussa kaksi mäntyosapuukuormaa. Tiivistämisen avulla osapuukuormat suurensivat 1,6- ja 1,7-kertaisiksi tiivistämättömiin kuormiin verrattuna. Karsimaton mäntyosapuukuorma tiivistyi ongelmitta, eikä kuorma pyrkinyt esimerkiksi nousemaan ylös. Tiivistyksen ansiosta osapuukuorma saadaan yli 40 %:n tiiviyteen. Kokeilussa osapuukuorman tiiviys jäi noin 10 % karsitun puutavaran tiiviyttä pienemmäksi.

Tuotantomenetelmien vertailussa saatua tulosta sovellettiin keskimääräiseen osapuukuorman kokoon, joka on ensiharvennusmännyllä tiivistämättä noin viisi kiintokuutiometriä (Kahala 1984, Korpilahti 1986). Tiivistetyn osapuukuorman koko on siten vähintään 8 m<sup>3</sup>.

### 5.3 Hankintakustannukset

Ensiharvennuspuun kantohintana käytettiin kaikissa tapauksissa ainespuun minimilatvaläpimitan (7 tai 5 cm) mukaan lasketulle kertymälle 70 mk/m<sup>3</sup>. Kokopuumenetelmissä (palsta- ja välivarastohaketus) kantohintaa laskettiin runkopuulle viiden sentin minimilatvaläpimitaan asti.

Tuloksia (taulukko 2) on syytä yleistää varoen, sillä tarkasteluperusteet kaipaavat vielä monilta osin kattavampia ja laajempia tutkimustietoja kuin mitä nyt oli käytettävissä. Lisäksi käsittelymenetelmät - varsinkin ketjukarsinta- ja massahakemenetelmät - ovat vielä kehitysvaiheessa. Koivun joukkohakkuuta ei ole kokeiltu, ja kokopuumenetelmien perusteet ovat epävarmempia kuin tavaralaji- ja osapuumenetelmien perusteet.

Ensiharvennuksissa hakkuu on hankintakustannusten osatekijöistä merkittävin, ja sen suuruus riippuu voimakkaasti olosuhteista - poistettavien puiden koosta. Eteläsuomalaisen männikön runkojakauma painottui selvästi suurempiin läpimittoihin kuin pohjanmaalaisen männikön ja koivikon runkojakaumat. Siksi hakkuun yksikkökustannukset suurenevät eteläsuomalaisen ”hyvän” ensiharvennusleimikon 47 mk:sta/m<sup>3</sup> pohjanmaalaisen koivikon 92 mk:aan/m<sup>3</sup>. Hakkuukustannukset ovat puunhankinnan kokonaiskustannuksista (ilman kantohintaa) vastaavasti 44 ja 58 %. Voidaan myös havaita, että kun minimiläpimitan pienentäminen lisäsi pienien runkojen määrää, hakkuukustannukset suurenevät. Metsäkuljetuksessa suurempi kertymä lisää hieman tuottavuutta, mutta sen vaikutus kuljetuskustannuksiin on pieni.

Joukkohakkuu antaa selvää kustannushyötyä karsitun kuitupuun hankintaan. Edullisimmiksi menetelmiksi osoittautuivat kuitenkin kokopuuhaketus- ja osapuumenetelmät, kun hankintakustannukset kohdistettiin koko talteen saadulle biomassalle.

TAULUKKO 2 Kuitupuun, osapuun ja kokopuuhakkeen (haketusvaihtoehdot) hankintakustannukset tehtaalle toimitettua biomassaa kohden, mk/m<sup>3</sup>

Ensiharvennusmännikkö, Etelä-Suomi						
Selite	Kuitupuu, 7 cm	Kuitupuu, 5 cm	Joukkoh., 5 cm	Osapuu, 5 cm	Palsta- haketus	Välivar.- haketus
Kertymä, m <sup>3</sup> /ha	87,4	96,1	100,1	110,8	123,2	123,2
Suhteellinen	1,00	1,10	1,15	1,27	1,41	1,41
Kantohinta	70,00	70,00	67,20	60,70	54,60	54,60
Hakkuu	46,70	48,80	40,40	35,30	22,40	28,70
Metsäkuljetus	19,20	18,50	18,50	23,10	41,80	23,30
Kuljetus 50 km	20,60	20,60	20,60	23,40	23,20	39,80
Muut kustann.	20,00	20,00	19,20	17,40	15,60	11,70
Yhteensä	176,50	178,00	166,00	159,90	157,60	158,10
Suhteellinen	1,00	1,01	0,94	0,91	0,89	0,90
Ensiharvennusmännikkö, Pohjanmaa						
Selite	Kuitupuu, 7 cm	Kuitupuu, 5 cm	Joukkoh., 5 cm	Osapuu, 5 cm	Palsta- haketus	Välivar.- haketus
Kertymä, m <sup>3</sup> /ha	40,9	50,9	53,1	59,9	70,0	70,0
Suhteellinen	1,00	1,24	1,30	1,46	1,71	1,71
Kantohinta	70,00	70,00	67,10	59,50	50,90	50,90
Hakkuu	79,40	84,70	65,30	56,10	33,90	42,80
Metsäkuljetus	20,50	20,00	20,00	24,20	41,80	23,30
Kuljetus 50 km	20,60	20,60	20,60	23,40	23,20	39,80
Muut kustann.	20,00	20,00	19,20	17,00	14,50	10,90
Yhteensä	210,50	215,30	192,20	180,20	164,30	167,80
Suhteellinen	1,00	1,02	0,91	0,86	0,78	0,80
Ensiharvennuskoivikko, Pohjanmaa						
Selite	Kuitupuu, 7 cm	Kuitupuu, 5 cm	Joukkoh., 5 cm	Osapuu, 5 cm	Palsta- haketus	Välivar.- haketus
Kertymä, m <sup>3</sup> /ha	29,8	39,9	40,5	43,5	64,9	64,9
Suhteellinen	1,00	1,34	1,36	1,46	2,18	2,18
Kantohinta	70,00	70,00	69,00	64,10	43,00	43,00
Hakkuu	92,00	116,20	88,30	78,80	58,40	73,30
Metsäkuljetus	23,10	22,10	22,10	27,50	41,80	23,30
Kuljetus 50 km	22,70	22,70	22,70	25,20	23,20	39,80
Muut kustann.	20,00	20,00	19,70	18,30	12,30	9,20
Yhteensä	227,80	251,00	221,80	214,00	178,70	188,70
Suhteellinen	1,00	1,10	0,97	0,94	0,78	0,83



Koska teollisuuden ainespuun ja energiajakeen arvot poikkeavat toisistaan paljon, kokonaiskertymälle kohdistetut hankintakustannukset eivät yksistään anna selvää perustaa arvioida eri tuotantomenetelmien paremmuutta. Monessa tilanteessa kuorellisen ainespuun hinta on kiinnostava tieto ja tärkeä arviointiperuste (taulukko 3).

TAULUKKO 3 Hankintakustannukset runkopuulle kohdistettuna, mk/m<sup>3</sup>

Hankintamenetelmä	Mänty, Etelä-Suomi		Mänty, Pohjanmaa		Koivu, Pohjanmaa	
	mk/m <sup>3</sup>	%	mk/m <sup>3</sup>	%	mk/m <sup>3</sup>	%
Kuitupuu, 7 cm	176,50	100	210,50	100	227,80	100
Kuitupuu, 5 cm	178,00	101	215,30	102	251,00	110
Joukkohakattu, 5 cm	166,80	95	193,30	92	222,90	98
Osapuu, 5 cm	174,70	99	201,00	95	229,90	101
Kokopuu, palstahake	183,00	104	199,30	95	201,00	88
Kokopuu, välivarastohake	183,50	104	203,50	97	212,20	93

Tässä vertailussa männyllä joukkohakkuu oli edullisin. Kokopuuhaketuksen kilpailukyky paranee, kun puuston järeys pienenee. Käytetyillä laskentaperusteilla kokopuuhaketukseen perustuvat menetelmät olivat koivikossa edullisimmat.

## 5.4 Selluhakkeen saanto ja tuotantokustannukset

### 5.4.1 Selluhakkeen saanto

Selluhakkeen ja energiajakeen saannot laskettiin tässä tutkimuksessa mitatuille leimikoille tuotantoketjuittain siten, että otettiin huomioon mm. hävikki metsävaiheessa ja kuorettoman puuaineen hävikki eli siirtyminen energiajakeeksi prosessoinnin eri vaiheissa.

Selluhakevertailut tehtiin ensisijaisesti kuitupuu- ja osapuuvaihtoehtojen kesken, koska kokopuuhakkeen tuotantoa ja puhdistusta massahakemenetelmällä ei ole demonstroitu niin, että näistä tuotantoketjuista olisi relevanttia tietoa. Chipset-palstahakkuria on tutkittu ensiharvennuspuun palstahaketuksessa, ja sen tuottama palakokojakauma määritettiin. Jakauma poikkesi selvästi selluhakkeen tavoitejakaumasta. Kyseistä hakkuria ei ole pyrittykään kehittämään selluhakkeen tuotantoa varten. MOHAN hakkurin on val-

mistanut tunnettu teollisuushakkureiden valmistaja (Bruks), joten voidaan odottaa, että sillä saataisiin hyvin selluhakkeen vaatimukset täyttävää haketta. MOHA-hakkuriautoa ei ole kuitenkaan ole kokeiltu ensiharvennuspuun haketuksessa

Tuotantoketjujen vertailussa käytetyiltä kolmelta leimikolta kuoretonta selluhaketta ja energiajakeetta kertyy taulukossa 4 esitetyt määrät. Selluhakkeen ja energiajakeen suhteelliset kertymät eri leimikoilta nykykäytännön mukaiseen 7 cm:n kuitupuumenetelmään verrattuna esitetään taulukossa 5. Hakkeen seulonnassa on energiajakeeseen erotettu alle 3 mm:n jae.

TAULUKKO 4 Selluhakkeen ja energiajakeen kertymät eri olosuhteissa ja tuotantoketjuilla, m<sup>3</sup>/ha

Erittely	Mänty, Etelä-Suomi		Mänty, Pohjanmaa		Koivu, Pohjanmaa	
	selluhake	energiajake	selluhake	energiajake	selluhake	energiajake
Kuitupuu, minimilatvalpm. 7 cm	75,1	12,3	35,1	5,8	25,0	4,8
Kuitupuu, minimilatvalpm. 5 cm	83,4	12,7	44,2	6,7	32,9	7,0
Joukkohakakattu, 5 cm	81,1	19,0	43,0	9,8	32,8	7,7
Osapuu, 5 cm, rumpukuorimo	83,8	27,0	44,4	9,3	32,8	10,7
Osapuu, 5 cm, ketjukarsinta	82,7	28,1	43,8	9,9	33,7	9,8
Osapuu, 5 cm, massahakelaitos	77,3	33,5	41,9	11,8	32,4	11,1

TAULUKKO 5 Selluhakkeen ja energiajakeen suhteelliset kertymät

Erittely	Mänty, Etelä-Suomi		Mänty, Pohjanmaa		Koivu, Pohjanmaa	
	selluhake	energiajake	selluhake	energiajake	selluhake	energiajake
Kuitupuu, minimilatvalpm. 7 cm	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Kuitupuu, minimilatvalpm. 5 cm	1,11	1,03	1,26	1,16	1,32	1,45
Joukkohakakattu, 5 cm	1,08	1,55	1,22	1,70	1,31	1,60
Osapuu, 5 cm, rumpukuorimo	1,12	2,20	1,26	1,61	1,31	2,22
Osapuu, 5 cm, ketjukarsinta	1,10	2,29	1,25	1,71	1,35	2,05
Osapuu, 5 cm, massahakelaitos	1,03	2,72	1,19	2,04	1,30	2,31

Kuorettoman puuaineen hävikkiä eli siirtymistä energijakeen joukkoon tapahtuu prosessoinnissa ja sen jälkeisessä seulonnassa. Kun seulontahävikkiin laskettiin purujakeen poisto eli 3 mm seulan alite, olivat kuivamassoista lasketut hävikkiprosentit tuotantomenetelmittäin seuraavat (taulukko 6).

TAULUKKO 6 Kuorettoman puuaineen hävikkiprosentit tuotantomenetelmittäin

Erittely	Mänty, Etelä-Suomi	Mänty, Pohjanmaa	Koivu, Pohjanmaa
	hävikkiprosentti		
Kuitupuu, minimilatvalpm. 7 cm	3,1	3,1	4,4
Kuitupuu, minimilatvalpm. 5 cm	3,7	3,7	5,9
Joukkohakakattu, 5 cm	6,4	6,4	6,4
Osapuu, 5 cm, rumpukuorimo	3,7	3,7	6,4
Osapuu, 5 cm, ketjukarsinta	4,9	4,9	4,9
Osapuu, 5 cm, massahakelaitos	11,9	11,9	7,5

Massahakemenetelmän heikkoutena muihin tuotantomenetelmiin nähden oli paljon suurempi kuorettoman runkopuun hävikki. Kun palakoon mukainen seulontahävikki oli massahakemenetelmässä vain 0,5 %, runkopuun hävikiksi piti asettaa 11 - 12 %, jotta prosessiin syötetystä määrästä laskettu tutkimusten osoittama saanto - männyllä 72 - 75 % ja koivulla 75 - 78 % prosessiin syötetystä raaka-aineesta kuoripitoisuuden jäädessä 1 %:iin - toteutui.

#### 5.4.2 Selluhakkeen tuotantokustannukset

Selluhakkeen tuotantokustannukset laskettiin siten, että hakkeen ja energijakeen yhteisistä hankinta- ja käsittelykustannuksista vähennettiin energijakeen määrälle laskettu 35 ja 45 mk:n/MWh hyvitys, ja kattamatta jääneet kustannukset kohdistettiin selluhakkeelle. Energijakeesta saatavan hyvityksen laskemiseksi käytettiin muuntosuhteina männyllä 1.8 ja koivulla 2.0 MWh/m<sup>3</sup>. Rumpukuorimon pääomakustannuksia ei otettu tarkasteluun mukaan.

Kaikissa tarkastelluissa tapauksissa selluhake oli edullisinta valmistaa joukkohakatusta kuitupuusta rumpukuorimolla (taulukko 7). Hyväksi ensiharvennukseksi luonnehdittavan eteläsuomalaisen männikön kuitupuun ja osapuun prosessointi rumpukuorimolla johti samansuuruisiin hakkeen tuotantokustannuksiin ja ketjukarsinta hieman niitä suurempaan hakkeen hintaan. Massahakemenetelmällä hake oli 10 - 15 % kalliimpaa. Pohjanmaan olosuhteissa joukkokarsitun kuitupuun ja osapuun rumpukuorimo- ja ketjukarsintakäsittelyt olivat edullisimpia.

TAULUKKO 7 Selluhakkeen tuotantokustannukset kun energiajakeesta hyvitetään 35 ja 45 mk/MWh

Erittely	Kuitupuu, kuorimo	Joukko- hakkuu, Kuorimo	Osapuu, kuorimo	Osapuu, ketju- kasinta	Osapuu, massahake
	selluhakkeen tuotantokustannukset, mk/m <sup>3</sup>				
Mänty, Etelä-Suomi, latvalpm. 7 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	205,60	201,90	211,70	213,20	237,60
" 45 "	202,70	197,80	207,00	208,30	230,70
Mänty, Etelä-Suomi, latvalpm. 5 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	205,90	201,20	211,00	215,70	235,30
" 45 "	203,11	197,02	205,18	209,52	227,50
Mänty, Pohjanmaa, latvalpm. 7 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	245,20	231,90	239,3	241,10	215,70
" 45 "	242,27	227,71	234,41	235,99	259,12
Mänty, Pohjanmaa, latvalpm. 5 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	248,20	233,80	241,40	246,60	264,20
" 45 "	246,13	229,58	235,15	240,00	256,40
Koivu, Pohjanmaa, latvalpm. 7 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	274,70	252,90	270,00	261,90	273,80
" 45 "	270,90	248,70	264,60	256,90	268,00
Koivu, Pohjanmaa, latvalpm. 5 cm					
Hyvitys 35 mk/MWh	306,40	274,70	291,30	284,50	294,70
" 45 "	302,10	270,00	284,20	278,70	287,90

Koivuhakkeen tuotantokustannukset vaihtelivat paljon. Joukkohakkuuseen ja rumpukuorintaan perustuva tuotanto oli selvästi kaikkia muita edullisempi, ja yksinpuinhakkuuvaihtoehto kallein. Pienempi minimilatvaläpimitta johti suurempiin tuotantokustannuksiin. On kuitenkin todettava, että edullisimpaan tulokseen johtanut tuotantomenetelmä on koivun joukkohakkuun osalta keikeilematta mutta osapuun ketjukarsintaa ja massahakelaitoskäsittelyä on tutkittu.

Myös hankintaan kokopuuhakkeena ja massahakemenetelmällä puhdistukseen perustuva selluhakkeen hinta laskettiin, vaikka tuotantoketjua ei ole demonstroitu. Kokopuuhakemenetelmä oli männyllä parhaimmillaan edullisimpien tuotantoketjujen veroinen ja koivulla jopa selvästi edullisin. Mikäli hakkeenkäsittelylaitos sijaitsee erillään sellutehtaasta ja lämpövoimalaitoksesta, hakkeen ja polttoaineen kuljetukset käyttöpaikoille lisäävät kustannuksia heikentäen menetelmän kilpailukykyä.

Yhtenä tavoitteena oli laskea tuotantokustannusten lisäksi eri menetelmillä tuotetuille selluhakkeille palakokojakaumaan ja jakauman arvosuhteisiin perustuvat arvot. Tähän mennessä saatujen tulosten vähäisyyden, suuren vaihtelun ja eri tuotantovaihtoehtojen kattamattomuuden vuoksi siihen ei ole perusteita.

## 5.5 Sellun tuotantokustannukset

Männylle laskettiin sellunvalmistuksenkin kustannukset (taulukko 8). Tarkastelu tehtiin KCL:ssä kehitetyllä laskentamallilla. Kyseistä mallia on käytetty aiemmissakin tarkasteluissa, mm. kuitupuun minimiläpimitan vaikutuksia selvitettyäessä (Korpilahti ym. 1995).

TAULUKKO 8 Mäntyselän suhteelliset tuotantokustannukset ensiharvennusmännystä kun kiinteästä energijakeesta saatava hyvitys on 45 ja 35 mk/MWh

Erittely	Etelä-Suomi		Pohjanmaa	
	energiahyvityksen suuruus, mk/MWh			
	45	35	45	35
Kuitupuu, minimilatvalpm. 7 cm	1,00	1,01	1,00	1,01
Kuitupuu, minimilatvalpm. 5 cm	1,03	1,04	1,05	1,06
Kuitupuu, joukkohakattu, 5 cm	..	..	0,96	0,98
Osapuu, rumpukuorimo, 5 cm	0,99	1,01	0,96	0,97
Osapuu, ketjukarsinta, 5 cm	0,99	1,05	0,98	1,00
Kokopuuhake, massahakelaitos	..	..	0,94	0,97

Energiahvityksen suuruutta varioitiin kiinteän polttoaineen osalta. Rumpukuorimon osalta tarkasteluun otettiin kaikki muut kuin pääomakustannukset. Tätä perusteltiin sillä, että sellutehtaan raaka-ainevirrasta vain pieni osa voi siirtyä muille käsittelymenetelmille. Muutoksen vaikutus rumpukuorimon kustannusrakenteeseen olisi pieni. Kuorimon pääomakustannukset laskettiin tapaustarkasteluna, ja ne olivat noin 7 mk/m<sup>3</sup>.

Kun suuri osa sellunvalmistuksen energiantuotannosta muodostuu mustalipeästä, kiinteiden poltojakeiden hinnanmuutokset vaikuttavat eniten osapuu- ja kokopuuketjuissa. Käytännössä ketjukarsinta- ja massahakemenetelmillä sellutehtaalte voitaisiin toimittaa kuoretonta haketta, ja energijake jäisi toimittavaksi muualle.

Tarkastelluissa tapauksissa selluntuotanto joukkohakkuuna valmistetusta kuitupuusta tai osapuusta rumpukuorintaan perustuen oli edullisempaa kuin tavanomaisesti valmistetusta kuitupuusta. Ketjukarsintamenetelmän kilpailukyky oli pienikokoisella puustolla parempi kuin hyvin järeytyneellä ensiharvennuspuulla. Pienikokoiselle puustolle laskettu kokopuuhakemenetelmä oli edullisin. Ketjukarsinnan ja kokopuuhakemenetelmien osalta ei laskettu erillistä hakkeen tai energiajakeen kuljetusta. Tarkastelu vastaa tilannetta, jossa ko. laitokset toimivat sellutehtaan yhteydessä.

## 6 TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT

Integroidut menetelmät tuottavat - kuten yksi niiden tavoite onkin - tavanomaisia puunkorjuuketjuja enemmän latvusmassaa energiakäyttöön. Latvusmassan määrä riippuu paljolti leimikon puuston rakenteesta ja sovellettavasta minimiläpimitasta. Kun metsikkö on kasvanut tiheänä ja latvusto on sulkeutunutta, vasta kokopuunakorjuulla saavutetaan merkittävä latvusmassan lisäys.

Aiemmissa vertailuissa (esim. Korpilahti 1996, Nousiainen ym.1995) leimikoiden latvusmassakertymät laskettiin Hakkilan (1991) esittämien keskiarvotietojen mukaan, koska latvuksista ei ollut käytettävissä mittatietoja. Tässä tapauksessa tarkastelut perustettiin metsiköistä mitattuihin puusto- ja latvustietoihin. Teollisuuden ainespuun talteensaanti on tässä tarkastelussa aiempaa parempi lähinnä massahakemenetelmää soveltavissa tuotantoketjuissa. Tarkistusten johdosta materiaalitiedot ovat aiempaa tarkemmat ja paremmin olosuhteita kuvaavat.

Hakkuu on kustannuksiltaan kallein työvaihe, ja sen suuruus ja oikeellisuus vaikuttavat merkittävästi tuotantokustannuksiin ja eri tuotantomenetelmien edullisuussuhteisiin. Tässä projektissa tuotettiin kenttäkokein uutta tietoa koneellisista osapuumenetelmistä ja kaato-kasauksesta. Kun kokeiluissa oli sama kuljettaja ja kone, jolta oli määritetty yksinpuin- ja joukkohakkuun tuottavuustiedotkin, saatiin tähän tarkasteluun aiempaa vertailukelpoisemmat perusteet. Aiemmasta poiketen osapuumenetelmät laskettiin nyt erilliseen kaato-kasaukseen ja metsäkuljetukseen eikä yhdistelmäkoneen käyttöön perustuen. Yhdistelmäkoneista ei ollut sovellettavaa tuottavuustietoa, mutta sen sijaan erilliset toimenpiteet voitiin perustaa nyt tehtyihin kaato-kasaus- ja osapuukuorman tiivistyskokeiluihin.

Eri menetelmien kustannussuhteet muuttuivat aiemmin esitetyistä siten, että kuitupuumenetelmät olivat nyt aiempaa selvästi edullisempia. Myös massahakemenetelmän suhteellinen asema parani, kun selluhakkeen saanto oli tutkijoiden ja käyttäjien antamien tietojen perusteella aiempaa suurempi.

Korjuukustannukset riippuvat olennaisesti runkojen koosta, ja sitä herkemmin mitä pienempiä puita käsitellään. Ensiharvennuksissa toimitaan tavallaan

äärioloissa, kokonaispuustoa kuvaavan runkolukusarjan alkupäässä. Integroidussa tuotannossa tarkastellaan jopa selvästi tavanomaisia kuitupuurunkoja pienempien puiden talteenottoa. Tällä soveltamisalueella ei ole nykytekniikan käytöstä vankkaa tietopohjaa. Siksi suuret muutokset tuloksissa ovat mahdollisia, kun uutta tietoa saadaan. On tärkeää, että pienikokoisten puiden korjuusta ja kuljetuksesta saadaan lisää sovellettavaa tutkimustietoa, sillä kaikkien integroitujen tuotantoketjujen kannattavuus riippuu olennaisesti siitä, kuinka edullisesti korjuu ja koko hankintaketju pystytään toteuttamaan.

Tässä projektissa voitiin kokeilla keräilykaatoon perustuvaa kaatokasausta palstahakkuria varten, osapuun valmistusta välivarasto- ja tehdasprosessointia varten sekä osapuukuorman tiivistystä liukupankkovarustuksella. Kokeet olivat yksittäisiä; niistä ei voida johtaa laajoja yleistyksiä, mutta ne osoittivat kyseisten ratkaisujen hyvän toimivuuden ja sovellettavuuden integroituihin korjuuketjuihin. Näillä menetelmillä erilaisissa oloissa saavutettavaa tuottavuutta ja kustannuskilpailukykyä tulisi tutkia.

Pienikokoisen puuston korjuussa on oletettu saavutettavan kustannusetua yhdistelmäkoneilla, joilla tehdään sekä hakkuu että metsäkuljetus. Sellaisia onkin hiljattain kehitetty ja kokeiltu ja saatu kilpailukykyisiä tuloksia tavanomaisiin koneketjuihin verrattuna (Lilleberg ja Korteniemi 1997). Koska päätavoite on ollut kuitupuun korjuu karsittuna tavaralajina, hakkuulaitteet perustuvat yksinpuinkäsittelyyn. Voidaan kuitenkin arvioida, että integroidussa korjuussa keräilykaatoon ja joukkokäsittelyyn perustuvalla tekniikalla on yksinpuinkäsittelyä suurempi kehityspotentiaali.

Sekä massahakelaitoksella että ketjukarsintalaitoksella saavutettavat tulokset kaipaavat varmentamista käytännön kokein. Palsta- ja välivarastohaketus vaikuttavat puunhankinnan tietojen perusteella potentiaalisilta vaihtoehdoilta. Niihin perustuvia tuotantoketjuja, mukaan lukien kokopuuhakkeen puhdistus, pitäisi kokeilla käytännössä. Vasta kokeilujen jälkeen niiden kilpailukyky ja kehittämismahdollisuudet voidaan määrittää paremmin. Myös erilaisilla tuotantoketjuilla tuotettujen hakkeiden ominaisuustietoja tulisi saada ja ottaa mukaan tarkasteluihin.

Integroitujen menetelmien merkitystä sellutehtaan energianäkökohtien kannalta tulisi tarkastella seikkaperäisemmin. Käytännössä havupuusta pyritään usein tuottamaan pitkäkuituista armeerausmassaa, ja siksi ensiharvennuspuun osuutta ei haluta lisätä. Myös mahdollisuudet ottaa tehdaskäsittelyyn suuria määriä karsimatonta puuta ovat rajoitetut. Integroidun tuotannon mahdollisuudet tulisi selvittää tehtaittain, ja tehdä tehdaskohtaisia, käytännön oloista lähteviä tuotantoketjujen vertailuja.

## VIITEKIRJALLISUUS

- Energiakatsaus 3/1997. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto. 42 s.
- Hakkila, P., Asikainen, A., Korpilahti, A. & Nurmi, J.** 1996. Päätehakkuualojen hakkuutähde polttoainelähteenä. Bioenergian tutkimusohjelma. Julkaisuja 11. Vuosikirja 1995. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Toim. E. Alakangas, VTT Energia. s. 95 – 107
- Hakkila, P., Kalaja, H. & Saranpää, P.** 1995. Etelä-Suomen ensiharvennuskuitu- ja energiapuulähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582. 92 s.
- Hakkila, P.** 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. 24 s.
- Imponen, V., Keskinen, S., Korpilahti, A., Lemmetty, J., Lilleberg, R., Pennanen, O., Poikela, A. & Vuorenperä, T.** 1997. Hake-, puu- ja puutavaramenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa. Bioenergian tutkimusohjelman projekti 110. Metsätehon raportti 22. 42 s.
- Kahala, M.** 1984. Osapuunakorjuu eteläsuomalaisissa harvennuskuituolosuhteissa. Metsätehon tiedotus 386. 20 s.
- Korpilahti, A.** 1997a. Integroitujen tuotantomenetelmien vertailu. Bioenergian tutkimusohjelma, puupolttoaineiden tuotantotekniikka, projektin 124 loppuraportti. 28 s.
- Korpilahti, A.** 1997b. Integroitujen tuotantomenetelmien vertailu - 124. Bioenergian tutkimusohjelma. Julkaisuja 11. Vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Toim. P. Nikku. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. s. 213 – 222
- Korpilahti, A.** 1996. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka -tutkimusalueen katsaus. Bioenergian tutkimusohjelma. Julkaisuja 11. Vuosikirja 1995. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Toim. E. Alakangas, VTT Energia. s. 35 – 50
- Korpilahti, A.** 1986. Kaatava kourasaha ensiharvennuskuitu-osa-puunakorjuussa. Metsätehon tiedotus 396. 16 s.
- Korpilahti, A., Varhimo, A., Keskinen, S. & Lemmetty, J.** 1995. Mäntykuitupuun minimiläpimitan vaikutus puunhankintaan ja sellunvalmistukseen. Metsätehon katsaus 11/1995. 6 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., 13 liitettä.
- Lilleberg, R.** 1994a. Yhdistelmäkone koko- ja osapuun korjuuseen. Metsätehon moniste 17.6.1994. 8 s.
- Lilleberg, R.** 1994b. Joukkokäsittelyharvesteri FMG 990/756 H ensiharvenusmännikössä. Metsätehon katsaus 8/1994. 6 s.
- Lilleberg, R. & Korteniemi, P.** 1997. Yhdistelmäkone ensiharvenusmet-sän puunkorjuussa. Metsätehon raportti 22.7.1997. 24 s., 1 liite
- Nousiainen, I., Asikainen, A., Korpilahti, A., Kuitto, P-J. & Vesisenaho, T.** 1995. Puupolttoaineiden tuotanto. Tutkimus- ja kehitystyön suuntaaminen vuosille 1996 - 98. Bioenergian tutkimusohjelma. Julkaisuja 8. VTT Energia, Jyväskylä 1995. s. 106 + liitt.7
- Poikela, A.** 1996. Latvusmassan pituussuuntainen jakauma. Metsätehon raportti 10. 28 s.
- Poikela, A. & Rieppo, K.** 1995. Chipset 536 C -hakeharvesteri polttoraaka-aineen hankinnassa. Metsätehon katsaus 8/1995. 10 s.
- Rieppo, K., Hakkila, P. & Kalaja, H.** 1997. Ketjukarsinta- ja pienrumpu-kuorintaan perustuvan laitteiston kehittäminen tuotantovalmiiksi - 119, D102. Bioenergian tutkimusohjelma. Julkaisuja 11. Vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Toim. P. Nikku. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. s. 177 – 190
- Thor, M.** 1996. Chipset 536 C stickvägsgående flisare - tidsstudie och systemanalys. SkogForsk. 16 s.