

**Ensiharvennusmänty sellutehtaan  
raaka-aineena**

Vesa Imponen  
Pentti Hakkila  
Risto Lilleberg  
Olavi Pennanen  
Antero Varhimo

Metsätehon raportti 24  
30.5.1997

Konsortiohanke

Asiasanat:  
ensiharvennusmänty, raaka-aineominaisuudet,  
tuotantokustannukset

Helsinki 1997

## SISÄLLYS

	Sivu
<b>ALKUSANAT</b> .....	3
<b>1 JOHDANTO</b> .....	4
<b>2 AINEISTOT</b> .....	5
<b>3 KORJUUVAIHEEN KOKEET</b> .....	7
3.1 Korjuumenetelmien aikatu tutkimus .....	7
3.2 Minimiläpimitan ja lajittelun vaikutus hakuun tuottavuuteen .....	8
<b>4 KUORINTA-, HAKETUS- JA KEITTOKOKEET</b> .....	9
4.1 Kokeiden toteutus ja mittaukset .....	9
4.2 Tulokset .....	10
4.2.1 Ensiharvennusmännyn rumpukuorinta .....	10
4.2.2 Puu- ja hakeanalyysit .....	12
4.2.3 Keitto ja valkaisu .....	14
4.2.4 Puun kulutus .....	15
4.2.5 Massojen ominaisuudet .....	16
<b>5 SULFAATTIMASSAN TUOTANTO- KUSTANNUKSET</b> .....	18
<b>6 TARKASTELU</b> .....	21
<b>KIRJALLISUUS</b> .....	22

## ALKUSANAT

Ensiharvennuspuun korjuu on ollut pitkään keskeinen tutkimus- ja kehittämistyön kohde. Myös puuntuotannossa sovellettavia harvennusmalleja on kehitetty ottaen huomioon nykyisen korjuutekniikan vaatimukset. Ensiharvennuspuun suhteelliset hankintakustannukset ovat pienentyneet, mutta silti ensiharvennusten metsänhoidollinen hakkuutarve on noin kolminkertainen viime vuosien hakkuumäärään verrattuna. Massanvalmistuskapasiteetin kasvu lisää tämän raaka-aineen kysyntää, mutta ensiharvennuspuun käytön laajentaminen vaatii myös sellaisten massa- ja paperituotteiden kehittämistä, joiden tuotannossa voidaan hyödyntää pienikokoisen puun erityisominaisuuksia. Käytännön sovelluksien toteuttaminen edellyttää lisäksi, että tuotteita sekä koko tuotanto- ja hankintajärjestelmän kaikkia vaiheita kehitetään samanaikaisesti.

Enso Oy:n Karjalan hankinta-alue ja Enocell Oy:n Uimaharjun tehdas tarjosivat puitteet tuotantomittakaavaiselle korjuu-, kuorinta- ja haketuskokeelle. Kokeisiin ja laskennallisiin tarkasteluihin perustuen tutkittiin ensiharvennuskannan minimiläpimitan, joukkokäsittelytekniikan sekä paksuuslajittelun vaikutuksia massan ominaisuuksiin ja kokonaistuotantokustannuksiin. Samalla tuotettiin perustietoa integroitujen aines- ja energiapuun hankintamenetelmien kannattavuustarkasteluja varten.

Ensosta hankintapäällikkö Ahti Ullgren ja metsätalousinsinööri Tarmo Pesonen sekä sellutehtaan kuorimohenkilökunta osallistuivat kokeiden suunnitteluun ja toteutukseen. Professori Pentti Hakkila ja hänen tutkijaryhmänsä Metsäntutkimuslaitoksesta vastasivat kuorinta- ja haketusvaiheen tutkimisesta. Erikoistutkija Antero Varhimo KCL:stä teki kokeitot sekä massa- ja kuituanalyysit osittain KCL:n oman harvennuspuuprojektin resursseilla. Metsätehossa hankkeeseen osallistuivat erikoistutkija Vesa Imponen, tutkija Risto Lilleberg ja erikoistutkija Olavi Pennanen.

## 1 JOHDANTO

Metsäteollisuus joutuu jatkuvasti sopeutumaan voimakkaisiin suhdannevaihteluihin, mikä heijastuu raaka-aineiden kysyntään. Tämä on merkinnyt sitä, että ensiharvennushakkuilla korkein kustannuksin korjattavaa ja jalostettavaa, kuituominaisuuksiltaan muuhun raaka-aineeseen verrattuna poikkeavaa pienikokoista puuta on tarvittu vain kausittain. Havukuitupuun kysyntää on heikentänyt myös sahateollisuuden tuotannon kasvu, joka on lisännyt sahanhakkeen määrää.

Ensiharvennusmännyn osuus yksityismetsien mäntykuitupuun hakkuumahdollisuuksista on eri metsäkeskusten toiminta-alueilla 23 - 36 %. Selluteollisuuden tehtyjen investointien seurauksena tämä potentiaali saatetaan hyödyntää aiempaa laajemmin.

Useimmille paperituotteille asetettaviin vaatimuksiin nähden ensiharvennuspuun kuidut ovat epäedullisia. Toisaalta nuoren puuaineen erityisominaisuuksia ei ole hyödynnetty sille sopivissa lopputuotteissa. Tämä on voinut osittain johtua siitä, että niitä ei tunneta riittävästi. Periaatteessa on myös mahdollista, että vain paras osa runkopuusta käytettäisiin massan valmistuksessa ja huonompi laatuista ositetta hyödynnettäisiin polttoaineena. Toimivia kuitupuun lajittelutekniikoita ei ole vielä kuitenkaan tarjolla.

Nykyisin kuitupuun hankinnassa ja käsittelyssä käytetään yleismenetelmiä ja -koneita, jotka eivät sovellu erityisen hyvin pienikokoiselle puulle. Tässä tilanteessa raaka-aineen kustannuksia ja laatua on yritetty hallita kuitupuulta vaadittavan vähimmäisläpimitan avulla. Toisaalta erikoistekniikoiden kehittäminen ja käyttö erityisesti ensiharvennuspuuta varten voivat nostaa toiminnan kokonaiskustannuksia. Yksi ratkaisuvaihtoehto on parantaa ja muuntaa nykyistä perustekniikkaa. Joukkokäsittelyyn pystyvä hakkuulaite on tämän tyyppinen ratkaisu, joka pienentää ensiharvennuspuun korjuukustannuksia. Useamman puun samanaikaisen karsinnan ja katkonnan seurauksena raaka-aineen ominaisuudet massanvalmistuksessa saattavat muuttua, koska karsinta on epätäydellistä eikä minimiläpimitasta voida pitää tarkasti kiinni.

Puunhankinnan ja -käsittelyn menetelmiä tutkittaessa on välttämätöntä selvittää koko tuotantoketjussa syntyvät vaikutukset metsästä tuotteeksi asti. Tämän projektin tavoitteena oli tutkia ensiharvennumännystä valmistetun massan kuituominaisuuksia ja tuotantokustannusmuutoksia, kun mäntykuitupuuta valmistetaan eri minimiläpimitoihin yksinpuin tai joukkokäsittelytekniikkaa hakkuussa soveltaen. Samalla ensiharvennuspuuta verrattiin tavalliseen päätehakkuun mäntykuitupuuhun. Lisäksi tutkittiin kokeellisesti ensiharvennumännyn paksuuslajittelun kustannus- ja raaka-ainevaikutuksia.

Kuorinta- ja haketuskokeet tehtiin tuotantomittakaavaisina ja keittokoheet laboratorio-olosuhteissa. Taloudellisissa laskelmissa otettiin huomioon hankinnan, puunkäsittelyn ja sellunvalmistuksen muuttuvat kustannukset. Vaikka tarkastelunäkökulma painottui kuituraaka-aineen käsittelyyn ja ominaisuuksiin, tavoitteena oli myös tuottaa perustietoja yhdistettyjen aines- ja energia-puun tuotantomenetelmien kilpailukyvyn selvittämistä varten. Projekti rahoitettiin osittain Bioenergia-tutkimusohjelman varoilla.

## 2 AINEISTOT

Ensiharvennumännyn korjuuta, rumpukuorintaa sekä massa- ja kuituominaisuuksia tutkittiin joulukuussa 1994 Enso Oy:n omissa metsissä Karjalan hankinta-alueella ja Enocell Oy:n sellutehtaalla Uimaharjussa. Metsäteho teki korjuun aikatutkimukset. Metsäntutkimuslaitos tutki runkopuun hävikin ja hakkeen kuoripitoisuuden sekä palakokojakauman. KCL teki koekeitot sekä hake- ja kuituanalyysit.

Hakkuukohteiksi valittiin hoidettuja ensiharvennumänniköitä, joissa puuston valtapituus oli noin 12 metriä. Enso Oy:n metsänkäsittelyohjeiden mukaan ensiharvennus tulisi tehdä kyseisen tyyppisissä männiköissä valtapituuden ollessa noin 12 - 14 metriä. Yhtiön metsänkäsittelyohjeisiin nähden ensiharvennus tehtiin kokeilussa siten aikaisessa vaiheessa, mikä toisaalta kuitenkin vastaa paremmin yksityismetsien tilannetta. Kasvupaikkatyypiltään metsiköt olivat kuivahkoja kangasmaita kahta kohdetta lukuun ottamatta, jotka olivat tuoreita kankaita. Tarmo Pesonen Enso Oy:n Karjalan hankinta-alueelta hankki kohteet korjuukokeisiin. Risto Lilleberg Metsätehosta vastasi korjuukokeen suunnittelusta, aineiston käsittelystä ja analysoinnista sekä raportoinnista. Reima Liikkanen Metsätehosta teki puuston mittaukset ja aikatutkimuksen.

Tutkimuksen kohteena oli minimiläpimitan ja joukkokäsittelyhakkuun vaikutukset hakkuun tuottavuuteen, hakkeen laatuun ja massaominaisuuksiin. Samassa yhteydessä selvitettiin pölkkyjen latvaläpimitan perusteella tehdyn lajittelun vaikutuksia massa- ja kuituominaisuuksiin (taulukko 1, s. 7).

## MÄNTYKUITUPUUKOE-ERÄT TEHDASVARASTOLLA

Päätehakkuu  
Yksinpuin hakkuu, minimiläpimitta 7 cm

Ensiharvennus  
Yksinpuin hakkuu, minimiläpimitta 7 cm

Ensiharvennus  
Yksinpuin hakkuu, minimiläpimitta 5 cm

Ensiharvennus  
Joukkokäsittely, minimiläpimitta 5 cm

Ensiharvennus  
Yksinpuin, lajittelu, minimiläpimitta 9 cm

Ensiharvennus  
Yksinpuin, lajittelu, minimiläpimitta 5 cm

Kaikki valok. Metsäteho

TAULUKKO 1 Kokeessa mukana olleet mäntykuitupuuerät ja vastaavien korjuukohteiden ominaisuudet. Erät 1 - 5 ensiharvennuskohteista; erä 0 on päätehakkuista korjattu referenssierä

Koe-erä	Metsiköt				Hakkuu		
	Metsä-tyyppi	Ikä, vuotta	Tiheys, runkoa/ha	Keskipituus, m	Poistuman $d_{1.3}$ , cm	Koneellisen hakkuun tekniikka	Minimiläpimitta, cm
0	-	-	-	-	-	Yksinpuin	7
1	VT	31	1 560	10,5	12,0	Yksinpuin	7
2	VT	34	1 600	11,5	11,5	Yksinpuin	5
3	MT	23	2 200	11,1	10,9	Joukkokäsittely	5
4	VT	32	1 400	11,9	12,7	Yksinpuin	9
5						Yksinpuin	5

Referenssierä oli päätehakkuista hankittua tavallista mäntykuitupuuta. Ensiharvennuskohteet olivat korjuuolosuhteiltaan lähes samanlaisia. Joukkokäsittelykohde erosi muista kuitenkin selkeästi kasvupaikkatyypin ja kasvatustihyden osalta. Sen kasvupaikka oli muita rehevämpi (MT) ja puusto selvästi nuorempaa vaikkakin samankokoista muihin kohteisiin verrattuna.

Pieniläpimittaisen ja paksumman ensiharvennuspuun oletettujen ominaisuuksien esille saamiseksi lajiteltiin 1 300 m<sup>3</sup> samoista kohteista korjattua ensiharvennusmäntyä hakkuun yhteydessä kahteen järeysluokkaan: vähintään 9 cm:n paksuiset tyvi- ja välipölkkyt omaksi eräkseen (näyte 4) ja 5 cm:n minimiläpimittaan valmistetut latvapölkkyt ja pienet tyvipölkkyt toiseksi kuorintakeräksi (näyte 5). Lähtökohtana oli, että pieniläpimittainen osite voidaan hyödyntää polttoaineena tai käyttää kuituna sille sopivissa tuotteissa. Koe tuotti myös ensiharvennusmännyn ominaisuuksista sekä käsittelystä tietoja, joita voidaan käyttää erilaisten tuotantoketjujen vertailussa.

### 3 KORJUUVAIHEEN KOKEET

#### 3.1 Korjuumenetelmien aikatutkimus

Tutkittavina oli vaihtoehtoisia hakkuumenetelmiä, joissa muuttujina olivat hakkuun työtekniikka ja minimiläpimitta. Aikatutkimus tehtiin vertailevan aikatutkimuksen periaatteella. Yksiotehakkuukone valmisti puutavaraa yksinpuin ja joukkokäsittelytekniikkaa käyttäen. Yksinpuin hakkuussa käytettiin 7 ja 5 cm:n minimiläpimittoja, ja joukkokäsittelystä tavoitteellisena

vähimmäisläpimittana oli 5 cm. Lisäksi selvitettiin puutavaran lajittelun



vaikutuksia hakkuun ajanmenekkiin kokeella, jossa latvaläpimitan perusteella puutavara valmistettiin kahteen erään. Toisen erän muodostivat vähintään 9 cm paksut tyvi- ja välipölkyt ja toinen erä koostui latvapölkkyistä sekä pienten runkojen tyvipölkkyistä, jotka oli valmistettu 5 cm:n vähimmäisläpimitaan.

Ennen hakkuuta koealoilta mitattiin puiden rinnankorkeusläpimitta 1 cm:n luokkiin ja puuston pituuskäyrän laatimista varten jokaisesta luokasta kolme pituushavaintoa. Puista mitattiin lisäksi elävän latvuksen alkamiskorkeus myöhemmin tehtäviä korjuumenetelmävertailuja varten. Aikatutkimuksessa koealojen koko oli 2 000 m<sup>2</sup>, ja niitä oli 9. Ajourat merkittiin koealan keskelle. Poistettavat puut valitsi koneenkuljettaja Enso Oy:ssä käytössä olevien harvennusohjeiden mukaisesti.

Koneenkuljettajana kokeilussa toimi urakoitsija Vesa Hakulinen Liperistä. Hänen työtaitonsa oli erittäin hyvä, ja hänellä oli kokemusta joukkokäsittelytekniikan käytöstä ensiharvennusten koneellisessa hakkuussa. Hakkuukoneena kokeilussa oli Lokomo 990/756 B.

### 3.2 Minimiläpimitan ja lajittelun vaikutus hakkuun tuottavuuteen

Kaikkien ensiharvennuskohteiden koneellisen hakkuun ajanmenekki selvitettiin aikatutkimuksella, joka tehtiin koeruuduittain. Aikatutkimustulosten pohjalta tehtiin simulointilaskelmat, joilla tulokset yleistettiin tyypillisiä männikön ensiharvennusolosuhteita vastaaviksi. Kuitupuupölkyn minimiläpimitan pienentäminen paransi hakkuun tuottavuutta silloin, kun runkojen vähimmäiskoko pidettiin ennallaan (taulukko 2).

TAULUKKO 2 Menetelmien väliset erot hakkuussa (R. Lilleberg). Vaihtoehtojen vertailua varten olosuhteet vakioitiin keskimääräisiä ensiharvennusemännikön korjuuolosuhteita vastaaviksi. Hakkuukertymä 41 m<sup>3</sup>/ha, rungon keskikoko 60 dm<sup>3</sup>

Menetelmä	Suhteellinen tuotos	Suhteellinen kertymä
Yksinpuin, 7 cm	100	100
Yksinpuin, 5 cm	109	108
Yksinpuin lajiteltuna, 9/5 cm	109	108
Joukkokäsittely, 5 cm	117	110

Aikatutkimus tehtiin kullakin korjuukohteella niille etukäteen rajatuilla ja mitatuilla koeruuduilla. Puutavaraa valmistettiin koealoittaisen tutkimussuunnitelman mukaan työntutkijan ohjaamana. Näin varmistettiin, että suunnitelman mukaisista läpimittavaatimuksista pidettiin kiinni. Kokeellinen tulos minimiläpimitan vaikutuksesta hakkuun kertymään ja tuottavuuteen vastasi erittäin hyvin laskennallisella simuloinnilla saatua tulosta tapauksessa, jossa minimirunkoa ei sallita pienennettävän nykyisestä 9 cm:n rinnankorkeusläpimittaluokasta. Jos myös rungon vähimmäisläpimittavaatimusta alennettaisiin minimiläpimitan myötä, kertymä kasvaisi enemmän, mutta samalla hakkuukustannukset kasvaisivat suhteellisen tuotoksen alentuessa. Hakkuun aikautkimuksen tuloksissa on mielenkiintoista myös se, että hakkuukoneella lajittelu kahteen eri paksuusluokkaan (9/5 cm) ei lisännyt puutavaran valmistuksen ajanmenekkiä. Se johtuu siitä, että yksioteharvesterityöskentelyssä lajittelun vaatimat liikkeet voidaan tehdä samanaikaisesti karsintakatkontavaiheen kanssa.

## **4 KUORINTA-, HAKETUS- JA KEITTOKOKEET**

### **4.1 Kokeiden toteutus ja mittaukset**

Koe-erien käyttäytymistä puunkäsittelyssä tutkittiin joulukuussa 1994. Tehtaan kuorimo on Kone Wood Oy:n toimittama. Rummun mitat ovat  $\varnothing$  5.5 x 38 m, ja jäisen puun sulatusta lukuun ottamatta kuorinta tehdään kuivana. Kuoriaukkojen mitat ovat rummun alkupäässä 45 x 600 mm ja loppuosassa 50 x 450/500 mm. Haketus tehdään läpipurkavalla 16-teräisellä HQ 900 -hakulla. Rummussa syntyville pätkille on erillinen pystysyöttöinen 6-teräinen BCR16-pätkähakku.

Kuorintaolosuhteita ei vakioitu, vaan erät ajettiin tehtaan puunkäsittelyn läpi pyrkien samaan, tavanomaiseen kuorintatulokseen. Eräkoot olivat 570 - 664 m<sup>3</sup>. Yhden erän käsittelyaika oli noin 3 tuntia.

Uimaharjun kuorinnan optimointijärjestelmä tallentaa tärkeimpien kuorinta-parametrien arvot minuutin välein. Tätä pyrittiin hyödyntämään koetulosten analysoinnissa, mutta kuorintaerien pienuus ja kuorinnan keskeyttämien näytteiden oton ajaksi vaikuttivat kuitenkin näihin arvoihin. Sen vuoksi raaka-aineen vaikutuksesta kuorintakapasiteettiin saatiin tässä tutkimuksessa vain viitteitä, joita ei voitu ottaa huomioon kustannuslaskelmissa.

Kunkin koejakson aikana linja pysäytettiin kahdesti hakenäytteiden ottamiseksi. Näytteet lapioitiin hakehihnalta saaveihin (15 kpl 80 l), jotka tyhjennettiin puhtaalle alustalle sekoittaen samalla haketta huolellisesti. Kustakin erästä pussitettiin 12 kpl 80 litran hakesäkkiä. Keskuslaboratorioissa hakeista määritettiin kuiva-ainepitoisuus, kuoripitoisuus, kuivatuoretiheys, asetoniliukoisten uuteaineiden pitoisuus, kokonaisligniinipitoisuus sekä palakokojakauma.

Kutakin näytettä edustavilla tuoreilla hakkeilla tehtiin sulfaattikeittoja pyörivissä vastuslämmitteisissä 15 litran keittimissä. Massojen tavoitekappalukuna oli 25 - 28. Keittosaannon tarkistamiseksi kutakin hakenäytettä keitettiin myös ilmakeivattuna (kuiva-ainepitoisuus noin 90 %). Kaikista massoista määritettiin kokonaissaanto, rejektiosuus, kappaluku sekä kuidunpituus ja -pituusmassa (Kajaani FS 200).

Jokaisesta koe-erästä valittiin valkaistavaksi yksi tavoitekappalukua lähellä oleva massa. Massat valkaistiin happidelignifioinnin jälkeen tyypillisellä ECF-sekvenssillä D(EO)DED tavoitevaaleutena 89 ISO. Valkaisun kemikaalikulutus ja loppu-pH määritettiin vaiheittain. Täysvalkaistuista massoista määritettiin valkaisun saanto, vaaleus, viskositeetti, PC-luku sekä kuidunpituus ja -pituusmassa (Kajaani FS 200). Massoille tehtiin myös McNett-kuitulajittelu.

Massojen paperitekniset ominaisuudet määritettiin PFI-jauhatuksen jälkeen. Kustakin jauhatuspisteestä määritettiin arkkiominaisuuksista vetoindeksi ja venymä, puhkaisuindeksi, repäisyindeksi, Zero-span vetoindeksi (märkä), ilmanläpäisyvastus, palstautumislujuus (Scott Bond), vaaleus, valosironta- ja absorptiokerroin sekä opasiteetti.

## **4.2 Tulokset**

### **4.2.1 Ensiharvennusmännyn rumpukuorinta**

Kuorintaerien eräkohtainen pölkkyjen keskipituus oli 392 - 438 cm. Erästä 2 tuli suunnitelmista poiketen lähes toisto erälle 1, koska otoksella mitattu toteutunut keskimääräinen minimiläpimitta oli molemmissa tapauksissa sama 9 cm (taulukko 3). Korjuun aikatutkimusaineistot muodostivat osan kuorintaeristä. Niitä kerättäessä puutavara valmistettiin täysin suunnitelmien mukaisesti.

Päättehakkuerän puuhäviö oli pienin, 1 %. Puuaineen hävikki oli suurin joukkokäsittelyn erän kuorinnassa, ja runsaasti pölkkyjen latvaosista katkeneita ohuita kappaleita oli nähtävissä patkähakulle johtavalla kuljetinhihnalla. Tässä kokeessa, jossa tavoiteläpimittana oli 5 cm, hävikki oli 4,2 %. Aiemmassa Uimaharjun kokeessa, jossa pyrittiin valmistamaan joukkokäsitelty puu 7 cm:iin, hävikki oli 3,0 % (Hakkila ym. 1995). Vaikka ensiharvennuspuun hävikit osoittautuivat suuremmiksi kuin päättehakkupuun, voidaan eroja pitää varsin kohtuullisina ainakin yksinpuin korjuun osalta.

Hakenäytteille mitatut kuoripitoisuudet vaihtelivat Metsäntutkimuslaitoksen mittauksen mukaan 0,17 %:sta 0,34 %:iin. Puuhäviö tunnetusti kasvaa pyritäessä pienempään kuoripitoisuuteen, joten mitattujen häviöiden vertailu vakiokuoripitoisuudessa lisää lähes kaikkien harvennusnäytteiden häviöitä vertailunäytteeseen nähden. Kyseessä olivat kuitenkin yksittäisnäytteet, eikä kuorintaa pystytty optimoimaan kullekin raaka-aineelle erikseen.

TAULUKKO 3 Runkopuun hävikki ja hakkeen kuoripitoisuus rumpu-kuorintakokeessa. Näyte-erät 4 ja 5 lajiteltiin samoissa korjuukohteissa metsässä (Hakkila ym. 1995)

Koe-erä	Mänty-kuitupuu-näyte	Puuta-varan valmis-tus	Tavoite-minimi-läpi-mitta, cm	Otoksella mitattu minimi-läpimitta, cm	Runko-puun hävikki, %	Hak-keessa kuorta, %	Energia-jakeen osuus, %
0	Pääte-hakkuu, referenssi	Yksin-puin	7	12,9	1,00	0,17	6,6
1	Ensihar-vennus	Yksin-puin	7	9,0	1,39	0,35	9,5
2	Ensihar-vennus	Yksin-puin	5	9,0	1,96	0,24	8,9
3	Ensihar-vennus	Jouk-kona	5	7,2	4,18	0,14	13,0
4	Ensihar-vennus	Yksin-puin, lajittelu	9	11,8	1,08	0,34	8,6
5	Ensihar-vennus	Yksin-puin, lajittelu	5	6,3	2,44	0,27	9,6

Tutkimuksessa ei vakioitu kuorintaolosuhteita, vaan käyttöhenkilökunta ajoi prosessia pyrkien tavanomaiseen kuorintatulokseen. Käytännössä se johti koe-erien välisiin ajotapaeroihin. 5 cm:iin valmistetut latvat ja niiden kanssa samassa erässä olevat pienet tyvet sekä joukkokäsittelypuu poikkesivat selvimmin päätehakkuupuusta. Ohuen puun erät kuorittiin pienemmällä rummun kierrosluvulla, ja rummun sulkuportti oli ylempänä kuin referenssiajossa. Kokeen aikana ei ollut mahdollisuutta varsinaiseen kuorintaolosuhteiden optimointiin, eikä tuloksista voitu arvioida luotettavasti koe-erien välisiä kuorintakapasiteetin eroja. Kuorinnan optimointijärjestelmän tallentamat tiedot tosin viittasivat siihen, että suuriläpimittaisten koe-erien (referenssi, paksut tyvet) kapasiteetti saattaa olla suurempi kuin pienempiläpimittaisten erien.

#### 4.2.2 Puu- ja hakeanalyysit

Koe-erät ajettiin peräkkäin, ja hakun terien terävyys vaihteli kokeen aikana tavanomaisissa rajoissa. Referenssinäytteellä terillä oli hakettu noin 2 000 m<sup>3</sup>, kun tavanomainen vaihtoväli on noin 4 000 m<sup>3</sup>. Terien terävyys ei merkittävästi vaikuta haketustulokseen terien tavanomaisen vaihtomenettelyn puitteissa.

TAULUKKO 4 Hakkeen palakokojakauma KCL:n mittausten mukaan. Näyte-erät 4 ja 5 lajiteltiin samoissa korjuukohteissa metsässä

Koe-erä	Mänty-kuitupuu-näyte	Puuta-varan valmis-tus	Tavoite-minimi-läpimitta, cm	Yli-suuri	Yli-paksu	Hyväk-sytty	Tikku-hake	Puru
0	Pääte-hakkuu, referenssi	Yksin-puin	7	0,0	3,9	91,4	4,0	0,7
1	Ensi-harvennus	Yksin-puin	7	0,7	4,2	87,0	6,7	1,4
2	Ensi-harvennus	Yksin-puin	5	0,2	5,5	87,0	6,1	1,2
3	Ensi-harvennus	Jouk-kona	5	1,4	9,5	79,7	7,8	1,6
4	Ensi-harvennus	Yksin-puin, lajittelu	9	0,8	5,1	87,2	5,9	1,0
5	Ensi-harvennus	Yksin-puin, lajittelu	5	0,6	6,2	83,6	8,1	1,5

Päätehakuupuusta saatiin palakokojakaumaltaan parasta haketta (taulukko 4). Sillä oli SCAN-menetelmän mukaisessa seulonnassa suurin hyväksytyjen jakeiden osuus, 91 %. Jokaisen ei-toivotun jakeen osuus oli koe-eristä pienin. Erityisen paljon referenssistä poikkesivat 5 cm:iin valmistetut erät. Palakokojakaumien erot olivat odotettuja, sillä puun pienen läpimitan tiedetään jo sinänsä olevan haketuksen kannalta epäedullista. Pölkkyjen katkeilu rummussa huonontaa syntyvän hakkeen laatua edelleen, koska lyhyet pätkät suuntautuvat huonosti hakun syöttökidassa ja katkenneiden puiden päistä syntyy

helposti tikkuja ja purua. Myös latvaosan oksaisuus lisää ylipaksun hakkeen määrää, kun läpimittaa alennetaan.

Referenssihakkeesta mitattu kuivatuoretiheys ( $420 \text{ kg/m}^3$ ) ja kuiva-ainepitoisuus (47 %) ovat männylle tyypillisiä. Ensiharvennuspuun kuivatuoretiheys oli 3 - 10 % pienempi ja kuiva-ainepitoisuus 11 - 12 % pienempi kuin referenssin (taulukko 5). Tiheyserot eivät johtuneet pelkästään erilaisista korjuutekniikoista. Näytteen alkuperä (kasvupaikka MT) ja muita näytteitä kymmenen vuotta nuorempi ikä selittävät pääosin joukkokäsittelytekniikalla korjatun näytteen 3 pienen tiheyden. Hakkilan ym. (1995) mukaan Etelä-Suomen ensiharvennusmännyn keskimääräinen tiheys kuivilla ja kuivahkoilla kankailla on  $404 \text{ kg/m}^3$  ja tuoreilla kankailla  $374 \text{ kg/m}^3$ . Tämän tutkimuksen näytteet 1 ja 2 (VT) ja 3 (MT) ovat siis yhdenmukaisia keskimääräisten tiheysarvojen kanssa.

TAULUKKO 5 Hakkeen tiheys, kuiva-ainepitoisuus ja kemiallinen koostumus

Koe-erä	Mänty-kuitupuu-näyte	Puuta-varan valmis-tus	Tavoite-minimi-läpimitta, cm	Kuiva-tuore-tiheys, $\text{kg/m}^3$	Kuiva-aine-pitoisuus, %	Asetoni-liukoiset uute-aineet		Kokonais-ligniini
						Osuus kuiva-massasta, %		
0	Pääte-hakkuu, referenssi	Yksin-puin	7	420	47	3,7	25,4	
1	Ensi-harvennus	Yksin-puin	7	404	42	3,6	25,6	
2	Ensi-harvennus	Yksin-puin	5	406	42	3,4	26,7	
3	Ensi-harvennus	Jouk-kona	5	379	37	3,5	26,3	
4	Ensi-harvennus	Yksin-puin, lajittelu	9	399	41	3,0	25,0	
5	Ensi-harvennus	Yksin-puin, lajittelu	5	392	39	2,8	26,8	

Näytteiden väliset kemiallisen koostumuksen erot olivat varsin pienet (taulukko 5). Vertailuerän uutepitoisuus oli korkeampi kuin harvennuspuunäytteillä. Sen sijaan ligniinipitoisuudet olivat pienimmät läpimitaltaan suurimmissa

sa näytteissä (vertailu- ja tyvinäytteet). Myös puun hiilihydraattipi-



toisuudet olivat näillä näytteillä suurimmat. Kemiallisen koostumuksen perusteella hake-erien keittyvyydessä ja saannoissa ei ollut odotettavissa suuria eroja.

#### 4.2.3 Keitto ja valkaisu

Näytteiden väliset erot keittymisessä olivat pienet. Keittyvyyden ja raaka-aineen kemiallisen koostumuksen välillä ei ollut yhteyttä; päätehakkuukuitupuuta keittyi hitaimmin. Myöskään saannoissa ei ollut havaittavissa selkeää raaka-aineriippuvuutta, eivätkä ne seuranneet johdonmukaisesti hakkeille määriteltyjä kemiallisia koostumuksia (taulukko 6). Hakkeiden palakokoerot (lähinnä paksun jakeen määrä) näkyivät sen sijaan lähes poikkeuksetta keiton rejektimäärissä.

TAULUKKO 6 Sellun saanto keiton ja valkaisun jälkeen prosentteina puun kuivamassasta

Koe-erä	Mänty-kuitupuunäyte	Puuta-varan valmistus	Tavoite-minimiläpimitta, cm	Keiton kokonais-saanto (kappa 27), %	Keiton rejekti puusta lasketuna, %	Val-kaistun massan saanto, %
0	Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	45.9	0.4	43.3
1	Ensiharvennus	Yksinpuin	7	46.6	0.5	43.8
2	Ensiharvennus	Yksinpuin	5	46.1	0.7	43.4
3	Ensiharvennus	Joukkona	5	46.1	1.1	43.1
4	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	46.0	0.7	43.3
5	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	46.2	0.6	43.4

Näytteiden väliset erot sulfaattikeiton alkalien kulutuksessa olivat pienet, eikä niissäkään ollut havaittavissa selvää riippuvuutta raaka-aineesta ja puun kemiallisesta koostumuksesta. Vertailunäytteen kulutus oli kuitenkin hieman suurempi kuin harvennuspuunäytteiden.

Valkaistujen massojen loppuvaaleudet olivat tavoitetasolla. Koe-erien välillä ei havaittu valkaisun saantojen eikä kemikaalikulutusten eroja. Myös valkaistujen massojen viskositeetit ja PC-luvut olivat samalla tasolla.

#### 4.2.4 Puun kulutus

Puun kulutukset laskettiin kuorellisiksi kiintokuutiometreiksi valkaistua sellutonna kohti ( $\text{m}^3 / \text{ton}$  90 % bleached pulp). Laskennassa käytettiin eri näytteille mitattuja energiajakeen osuuksia sekä valkaistun massan saantoja. Energiajakee puolestaan koostuu kuoresta (80 - 90 %), ja sen joukkoon kuorrinnassa siirtyneestä puuaineesta (taulukko 7).

TAULUKKO 7 Puun kulutus sellutonna kohti, puuaineen tiheys ja energiajakeen osuus

Koe-erä	Mänty-kuitupuu-näyte	Puuta-varan valmistus	Tavoite-minimi-läpimitta, cm	Energia-jakeen tilavuus-osuus, %	Puuai- neen kuiva- tuore- tiheys, $\text{kg}/\text{m}^3$	Puun kulutus, $\text{m}^3/$ selluton- ni
0	Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	9,6	420	5,48
1	Ensiharvennus	Yksinpuin	7	13,3	404	5,88
2	Ensiharvennus	Yksinpuin	5	12,3	406	5,81
3	Ensiharvennus	Joukkona	5	16,3	379	6,44
4	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	12,1	399	5,93
5	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	12,7	392	6,08

Järeämpien ensiharvennusmäntyerien ja referenssin välinen puun kulutusero oli 0.3 - 0.4  $\text{m}^3/\text{sellutonna}$ . Joukkokäsittelymenetelmää edustaneen näytteen 3 osalta puun kulutusta lisäsivät suuri energiajakeen osuus sekä puuaineen pieni tiheys, joka johtui korjuukohteen nuoresta iästä ja viljavasta kasvupaikasta (MT). Pölkkyjen latvaläpimittaan perustuvan lajittelun vaikutus puuaineen tiheyteen ja sitä kautta puunkulutukseen oli verraten vähäinen (näytteet 4 ja 5).

#### 4.2.5 Massojen ominaisuudet

Ensiharvennuserät poikkesivat kuituominaisuuksiltaan selvästi vertailuerästä. McNett-kuitulajittelussa vertailunäytemassasta jäi karkeimpaan +14-jakeeseen yli 20 %, ja ensiharvennusnäytteistä jäi vain 1 - 5 %. Pituudella painotettu kuidun keskipituus (Kajaani FS 200) oli referenssinäytteellä noin 2 mm ja järeämmillä ensiharvennuspuunäytteillä noin 1.6 mm. Ensiharvennusmännylle oli tyypillistä referenssiä pienempi kuidun pituusmassa ja kuidun seinämän paksuus (taulukko 8).

TAULUKKO 8 Valkaistun massan kuituominaisuudet

Koe-erä	Mänty-kuitupuunäyte	Puuta-varan valmistus	Tavoite-minimiläpimitta, cm	Kuidun pituus, mm	Kuidun pituus-massa, mg/m	Kuidun seinämän paksuus, µm
0	Pääte-hakkuu, referenssi	Yksipuinen	7	1,97	0,211	5,3
1	Ensiharvennus	Yksipuinen	7	1,64	0,217	5,2
2	Ensiharvennus	Yksipuinen	5	1,60	0,194	5,2
3	Ensiharvennus	Joukkona	5	1,45	0,178	4,9
4	Ensiharvennus	Yksipuinen, lajittelu	9	1,67	0,202	5,2
5	Ensiharvennus	Yksipuinen, lajittelu	5	1,55	0,186	5,1

TAULUKKO 9 Valkaistujen sulfaattimassojen paperitekniset ominaisuudet vetoindeksissä 70 Nm/g PFI-jauhatuksen jälkeen

Paperitekniset ominaisuudet	Koe-erä					
	0	1	2	3	4	5
	Pääte- hakkuu	Ensiharvennus				
	Yksin- puin	Yksin- puin	Yksin- puin	Jouk- kona	Yksin- puin, lajittelu	Yksin- puin, lajittelu
Jauhatuskierrokset, PFI	1 429	1 240	1 409	1 011	1 510	1 000
Repäisyindeksi, mNm <sup>2</sup> /g	15,8	14,2	13,4	11,2	13,0	13,4
Valonsirontakerroin, m <sup>2</sup> /kg	20,1	20,9	20,3	21,1	20,4	20,6
Tiheys, g/cm <sup>3</sup>	0,72	0,74	0,75	0,76	0,74	0,74
Ilmanläpäisyvastus, Gurley, s	2,4	4,2	4,5	8,4	4,3	3,9
Scott Bond, J/m <sup>2</sup>	273	354	~ 500	> 500	~ 500	420
Zero span, märkä, Nm/g	126	117	112	112	121	112

Kun massojen paperitekniisiä ominaisuuksia verrattiin samassa vetolujuudessa (taulukko 9), ensiharvennuskäynnistä valmistetut massat poikkesivat vertailunäytteestä seuraavasti:

- sama vetolujuus saavutettiin pienemmällä jauhatusmäärällä
- kuidun lujuus (Zero span) ja repäisylujuus olivat huonommat
- arkki oli tiheämpi ja tiiviimpi
- valosirontakerroin oli hiukan suurempi
- sitoutuneisuus (Scott Bond) oli parempi.

Massojen repäisylujuus-vetolujuuskäyrän (kuva 1) mukaan massat sijoittuivat kolmelle tasolle. Päätehakkuulla korjattu vertailunäyte oli lujuudeltaan paras ja joukkokäsitelty tuoreen kankaan näyte huonoin. Muut erät sijoittuivat näiden väliin. Ensiharvennuspuiden lajittelulla ei saavutettu merkittävää lujuuden paranemista (näytteet 4 ja 5).



**Kuva 1.** Valkaistujen mäntymassojen repäisylujuudet eri vetolujuuksilla.

Näyte n:o	Hakkuutapa	Puutavaran valmistus	Minimiläpimitta
0	Päätehakkuu	Yksinpuin hakkuu	7 cm
1	Ensiharvennus	Yksinpuin hakkuu	7 cm
2	Ensiharvennus	Yksinpuin hakkuu	5 cm
3	Ensiharvennus	Joukkokäsittely	5 cm
4	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9 cm
5	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5 cm

Mekaanisten painopapereiden valmistajat ovat perinteisesti arvostaneet luji-temassana käytettävän havupuusellun ominaisuuksista pitkäkuituisuutta ja hyvää repäisylujuutta. Huonompi lujuus merkitsee, että paperin selluosuutta on kasvatettava. Tämä puolestaan lisää kustannuksia, koska sellu on kalliimpaa kuin mekaaninen massa.

## **5 SULFAATTIMASSAN TUOTANTOKUSTANNUKSET**

Metsäntutkimuslaitoksen, KCL:n ja Metsätehon tulokset yhdistämällä laskettiin puunhankinnan ja sellun valmistuksen kustannukset siten, että korjuuolosuhteet ja kuljetusetäisyydet vakioitiin. Näin saaduissa tuloksissa näkyy raaka-aineen ominaisuuksien ja korjuu- ja puunkäsittelytekniikan vaikutus kokonaistuotantokustannuksiin. Ne laskettiin KCL:n sulfaattimassan valmistuskustannusmallilla, ja tulokset vastaavat keskimääräisiä havusellun

tuotantokustannuksia. Mallin tietoja ei muokattu vastaamaan Enocell Oy:n prosesseja. Laskelmat sisältävät kantohinnan, puunhankintakustannukset ja sellunvalmistuksen muuttuvat kustannukset. Kaikkien mäntykuitupuuerien kantohinta oletettiin samaksi.

TAULUKKO 10 Sellun kokonaistuotantokustannukset. Korjuuolosuhteet vakioitu. Kuljetusmatka 80 km. Puuaineen ominaisuudet kuorintakokeen mukaiset. Puunhankintakustannukset esitetään kuutiota kohti ja kokonaiskustannukset sellutonna kohti

Koe-erä	Mäntykuitupuunäyte	Puuta- varan valmis- tus	Tavoite- minimi- läpi- mitta, cm	Suh- teel- liset korjuu- kustan- nukset	Suh- teel- linen tehdas- hinta	Suhteel- liset ko- konais- tuotan- to- kustan- nukset
0	Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	100	100	100
1	Ensiharvennus	Yksinpuin	7	191	120	120
2	Ensiharvennus	Yksinpuin	5	180	117	118
3	Ensiharvennus	Joukkona	5	173	116	126
4	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	186	119	121
5	Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	186	119	122

Taulukossa 10 esitetyt sellun tuotantokustannukset osoittavat puuaineen laadun merkittävän vaikutuksen kokonaiskustannuksiin. Joukkokäsittelyn erän tehdashinta oli harvennuseristä alhaisin, ja tässä tapauksessa sellun korkeat tuotantokustannukset johtuivat pienestä saannosta ja suuresta energiajakeen osuudesta. Joukkokäsittely harvennusemetsä oli iältään nuorempi ja kasvupaikaltaan viljavampi kuin muut kohteet, ja poikkeavat puuaineen ominaisuudet vaikuttavat vertailun tuloksiin.

Imponen ym. (1997) tutki vaihtoehtoisten ensiharvennusemetsän hankintaketjujen taloudellisuutta. Näissä laskelmissa puuraaka-aineen ominaisuudet vakioitiin. Puunkäsittelyssä oletettiin syntyvän aiempien tutkimusten mukaiset puuhävikit (Hakkila ym. 1995) ja energiajakeetta arvoitettiin vaihtoehtoisen polttoaineen kustannusten mukaisesti. Koneellistettu osapuunakorjuu ja

rumpukuorinta johtivat halvimpiin sellun tuotantokustannuksiin, kun kuljetettäisyys oli alle 60 km. Pitemmällä matkoilla joukkokäsittelytekniikkaan perustuva hankintaketju oli edullisin vaihtoehto. Energiajakeen arvon kasvassa osapuumenetelmien kilpailukyky paranee (kuva 2).

**Kuva 2.** Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun suhteelliset tuotantokustannukset (hankinta ja sellun valmistus). Kuitupuun minimiläpimitta 7 cm, vaihtoehtoisen polttoaineen hinta 30 mk/MWh (Imponen ym. 1997).

Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun kokonaistuotantokustannukset ovat 20 - 25 % kalliimpia kuin päätehakkuiden männystä valmistetun sellun, jos kantohinnat oletetaan näissä tapauksissa yhtäsuuriksi. Käytännön puukaupassa tämä kustannusero vaikuttaa ensiharvennuspuusta maksettavaan hintaan. Korjuutekniikkaa ja puunkäsittelyä kehittämällä voidaan kuitenkin vaikuttaa pieniläpimittaisen puun hyödyntämismahdollisuuksiin.



## 6 TARKASTELU

Sellun tuotantokapasiteettia on lisätty viime vuosina, ja kuitupuun tarve on kasvanut. Ensiharvennusmänty on yksi varteenotettava raaka-ainelähde. Sen käytön lisääminen edellyttää kuitenkin koko tuotantoketjun sekä tuotteiden tutkimus- ja kehittämistyötä. Toisaalta sellun laatuvaatimukset voivat myös vaihdella kysynnän mukaan, mikä säätelee ensiharvennushakkuiden määrää.

Tämän tutkimuksen tulokset luonnehtivat ensiharvennusmäntyä sulfaattimassan raaka-aineena seuraavasti:

- Yksioteharvesterin tuotosta voidaan parantaa joukkokäsittelytekniikalla.
- Minimiläpimitan pienentäminen lisää kertymää ja parantaa yksinpuin hakkuun tuottavuutta, jos minimirunkoa ei samalla pienennetä.
- Pieniläpimittainen puu voidaan käsitellä rumpukuorimoissa kohtuullisin puuhäviöin, jos se kuoritaan omina erinään erillään järeämmästä puusta.
- Ensiharvennuspuun käytölle ei ole keittoon ja valkaisuun liittyviä esteitä. Niissä poikkeamat tavalliseen mäntykuitupuuhun verrattuna ovat pienet.
- Ensiharvennuspuun hankinnan ja massan valmistuksen kustannukset ovat selvästi korkeammat kuin päätehakkuista hankitulla puulla. Tämä johtuu pääosin ensiharvennuspuun korkeista korjuukustannuksista ja suuremmasta puunkulutuksesta.
- Ensiharvennusmännystä valmistettu massa poikkeaa päätehakkuun mäntymassasta; sen kuidun pituus on pienempi ja repäisylujuus heikompi.

Kuituominaisuuksien erot vastasivat aikaisempia tuloksia. Ensiharvennusmänty ei ole soveliaain raaka-aine pitkäkuituisuutta ja repäisylujuutta edellyttävän armeerausmassan valmistukseen. Toisaalta ohutseinäisten harvennuspuun kuitujen sitoutumiskyky on hyvä, minkä seurauksena paperin pinta on sileä ja tiivis. Pieniläpimittaiselle puulle tulisi etsiä käyttökohteita, joissa raaka-aineen erityisominaisuudet voidaan hyödyntää. Tutkimustarve on tällä alueella ilmeinen; mm. ensiharvennusmassan soveltuvuutta kartongin ja hienopaperin valmistukseen kannattaisi selvittää.

Kuitupuun minimiläpimitan vaikutus sellun kokonaistuotantokustannuksiin on pieni käytännössä kysymykseen tulevalle vaihtelualueella (5 - 9 cm), jos korjattavan rungon vähimmäiskokoa ei samalla muuteta. Läpimittalajittelu vaikuttaa kuituominaisuuksiin, mutta tässä tutkimuksessa lajiteltujen erien väliset erot olivat suhteellisen pieniä.

Korjuukustannuksia alentavan joukkokäsittelyhakkuun vaikutusta kuituraaka-aineen ominaisuuksiin ei saatu aukottomasti selvitettyä tällä kokeella. Tämän vuoksi olisi tarpeellista tehdä uusi tutkimus, jossa vakioitaisiin mahdollisimman pitkälle puiden ominaisuudet ja joukkokäsittelytekniikalla valmistettaisiin homogeenisesta raaka-aineesta vaihtoehtoisin minimiläpimittoihin tehtyä puutavaraa.

Erilaisten pieniläpimittaisen kuitupuun hankintamenetelmien edullisuusvertailussa suurimmat epävarmuustekijät ovat olleet sellutehtaan puunkäsittelyssä syntyvät raaka-ainevaikutukset sekä riittävän tarkkojen puunkäsittelyn kapasiteetti- ja kustannustietojen puuttuminen. Enocell Oy:n tehdasmittakaavainen koe tuotti ensiharvennusmännyn ominaisuuksista, korjuusta, kuorinnasta sekä haketuksesta tietoja, joita suoraan hyödynnettiin myös erilaisten integroitujen kuitu- ja puupolttoaineen tuotantoketjujen taloudellisuuden tarkastelussa (Imponen ym. 1997). Erilaisen puuraaka-aineen vaikutukset rumpukuorimon kapasiteettiin ja kustannuksiin jäivät kuitenkin tässä hankkeessa selvittämättä.

## KIRJALLISUUS

**Hakkila, P. - Kalaja, H. & Saranpää, P.** 1995. Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energianlähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582. 1995

**Imponen, V. - Keskinen, S. - Lilleberg, R. - Poikela, A. - Lemmetty, J. - Korpilahti, A. - Pennanen, O. & Vuorenpää, T.** 1997. Hake-, osapuu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa. Metsätehon raportti 22, 23.4.1997