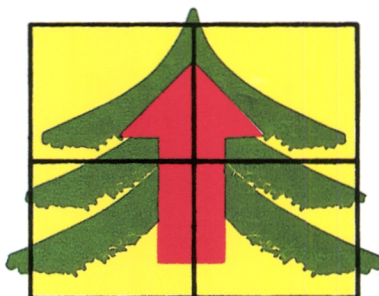


Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä

Pentti Hakkila, Hannu Kalaja ja Pekka Saranpää

Bioenergian tutkimusohjelma



Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköt kuitu- ja energialähteenä

Pentti Hakkila, Hannu Kalaja ja Pekka Saranpää

**Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582
Vantaa 1995**

TEKNOLOGIAN KEHITTÄMISKESKUKSEN
ENERGIATEKNOLOGIAN TUTKIMUSOHJELMAT 1993 - 1998

BIOENERGIA
Bioenergian tutkimusohjelma
Koordinointi:
VTT Energia

PL 1603, 40101 JYVÄSKYLÄ
puh. (941) 672 611, telefax (941) 672 597

ISBN 951-40-1489-8
ISSN 0358-4283

Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 1996

Hakkila, P., Kalaja, H. ja Saranpää, P. 1995. Etelä-Suomen ensiharvennumänniköt kuitu- ja energialähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582. 93 s. +6 liites. ISBN 951-40-1489-8, ISSN 0358-4283.

Nuorten männiköitten vuosittainen ensiharvennustarve on Suomen eteläpuoliskossa 100 000 ha ja sitä vastaava kuorellisen runkopuun potentiaalinen hakkuupoistuma 4,5 milj. m³, josta noin 3,4 milj. m³ on mäntyä. Bioenergian tutkimusohjelman puitteissa kehitetään menetelmiä, joilla pienikokoinen ensiharvennuspuu voitaisiin ottaa tehokkaasti talteen ja työstää laadukkaaksi kuituraaka-aineeksi ja energiapuuksi.

Ensiharvennumänty poikkeaa ominaisuuksiltaan vanhemmista leimikoista korjattavasta puutavarasta. Etelä-Suomen ensiharvennumännyn keskimääräinen kuiva-tuoretiheys on kuorettomassa runkopuussa 395 kg/m³ ja kuorellisessa runkopuussa 376 kg/m³. Kuori-aineuksen tiheys on vastaavasti vain 267 kg/m³. Kuoren osuus on pystyvuussa 15 % rungon tilavuudesta ja 10 % rungon kuivamassasta. Kuidun keskimääräinen pituus on 2,3 mm, asetoniin liukenevien uuteaineitten osuus 3,3 % kuivamassasta, kuorellisen puun kosteus kaatohetkellä 59 % ja puutavaran tuoretiheys 906 kg/m³. Latvuksen kuivamassa on kuivat oksat ja neulaset mukaan luettuina 28 % rungon kuorelliseen massaan verrattua, ja puun koko biomassan tehollinen lämpöarvo 40 %:n kosteudessa keskimäärin 1,9 MWh/m³.

Puun teknisten ominaisuuksien puolesta ensiharvennumänty on potentiaalista kuitupuuta 5 cm:n latvaläpimitaan saakka. Tämän potentiaalisen kuitupuun osuus on 65 % tyypillisen ensiharvennumäntyleimikon biomassapoistumasta. Loput 35 % eli alle 5 cm:n latvakappale, rungon kuori ja kaikki latvusmassa ovat ensisijaista energiapuuta. Metsämaan ravinnetasapainon turvaamiseksi alle 5 cm:n latvakappale oksineen eli 14 % kaikesta biomassasta suositellaan kuitenkin jätettäväksi tähteenä metsään.

Korjuun ja käytön tehostamiseen tähtäävässä tutkimuksessa näyttelee keskeistä osaa kuituraaka-aineen ja energijajakeen erottaminen toisistaan. Tässä hankkeessa tutkimuksen kohteina ovat reikäroottorikuorinta, rumpukuorinta, ketjukarsinta-kuorinta sekä ketjukarsinta-kuorinnan ja rumpukuorinnan yhdistelmä. Kaikissa menetelmissä on mahdollista rajoittaa runkopuun hukka alle 3 %:n, ja ketjukarsinta-kuorintamenetelmää lukuun ottamatta kuitupuun kuoripitoisuus on saatavissa alle 0,5 %:n. Ketjukarsinta-kuorinnan ja rumpukuorinnan yhdistelmä on mielekäs vaihtoehto silloin, kun ensiharvennumänty korjataan energiapuun talteenoton tehostamiseksi karsimattomana osapuuna.

Poikkeavien ominaisuuksiensa vuoksi ensiharvennumänty tulisi ainakin kuorintavaiheessa käsitellä omana erillisenä tavaralajinaan ja sekoittaa muun kuituvirran joukkoon tasaisessa seossuhteessa vasta kuorinnan jälkeen. Sellu- ja paperituotteitten edelleen erikoistuesssa ensiharvennumännyn erilliskäsittely saattaa osoittautua tarkoituksenmukaiseksi niin ikään myös kuidutuksessa ja paperin valmistuksessa.

Avainsanat: mänty, ensiharvennus, kuitupuun, energiapuun, puun ominaisuudet, kuorinta, karsinta

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. Hanke: 3137. Hyväksynyt: tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen 18.12.1995.

Kirjoittajien yhteystiedot: Pentti Hakkila, Hannu Kalaja ja Pekka Saranpää: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Puhelin: 90-857 051, Fax: 90-8570 5361.

Jakelu: Metsäntutkimuslaitos, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki, Puhelin: 90-857 051, Fax: 90-625 308.

Sisällysluettelo

Esipuhe	5
1 Ensiharvennus osana metsänkasvatusta	6
1.1 Harvennushakkuitten tavoitteet	7
1.2 Ensiharvennusmänniköt	7
1.3 Ensiharvennus teknis-taloudellisena ongelmana	10
2 Ensiharvennusmännyn tekniset ominaisuudet	14
2.1 Tutkimusaineisto ja menetelmä	14
2.2 Kuoren määrä	17
2.2.1 Kuoren määrän vaihtelu rungon pituussuunnassa	17
2.2.2 Kuoren määrän vaihtelu runkojen välillä	20
2.2.3 Kuoren määrän vaihtelu leimikoitten välillä	21
2.3 Puuaineen kuiva-tuoretiheys	24
2.3.1 Tiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa	26
2.3.2 Tiheyden vaihtelu runkojen välillä	28
2.3.3 Tiheyden vaihtelu leimikoitten välillä	30
2.4 Puuaineen uuteainepitoisuus	32
2.5 Kuidun pituus	34
2.6 Kosteus	37
2.7 Lämpöarvo	40
2.8 Yhteenvedo runkupuun ominaisuuksista	41
3 Ensiharvennusmännyn biomassakoostumus	43
3.1 Latvusmassan koostumus	43
3.2 Runkomassan koostumus	47
3.3 Mittavaatimusten vaikutus kertymään	48
3.3.1 Laskelmien esimerkkileimikko	48
3.3.2 Runkohukkapuu	50
4 Tehostetun talteenoton vaikutus maan ravinnevaroihin	53
5 Potentiaalinen kuitupuu ja ensisijainen energiapuu	56
6 Energiapuun erottaminen kuitupuusta	59
6.1 Reikäroottorikuorinta	60
6.2 Rumpukuorinta	63
6.2.1 Enocellin rumpukuorintakoe lokakuussa 1993	65
6.2.2 Metsä-Serlan rumpukuorintakoe maaliskuussa 1994	66
6.2.3 Enocellin rumpukuorintakoe joulukuussa 1994	68
6.3 Ketjukarsinta-kuorinta	70
6.4 Yhdistetty ketjukarsinta-kuorinta ja rumpukuorinta	78
7 Loppupäätelmät	82
7.1 Korjuumenetelmän vaikutus kertymään	82
7.2 Karsinta- ja kuorintamenetelmien vertailu	84
7.3 Ensiharvennusmännyn erityisominaisuuksien hyödyntäminen	87
Viitekirjallisuus	91
Liite	94

Esipuhe

Aina 1990-luvun alkuunsaakkametsäteollisuutemme oli valmis käyttämään hyväkseen kaiken tarjolle tulleen puutavaran ja maksoi puun tuottajille yleismaailmalliseen tasoon nähden korkeita kantohintoja. Myös heikkolaatuisella ja pienikokoisella puulla oli menekkiä, erityisesti kun sen talteenottoa tuettiin tasaamalla leimikoitten välisiä arvosuhde- ja kustannuseroja pienpuuta suosien. Tämä kannusti nuorten metsien kunnostamiseen metsänhoidollisten tavoitteitten mukaisesti.

Ensiharvennusohjelman toteuttamista jarruttaa nykyisin kuitenkin leimikkokohtainen kustannusvastaavuuden vaatimus. Ensiharvennuksista uhkaa tulla metsänhoitojärjestelmämme akilleenkantapää. Puun vajaakäyttötilanteessa ensiharvennuspuu on ongelmatuote, jonka korjuu- ja markkinointivaikeudet ainakin ajoittain ja paikallisesti jäytävät nuorten metsien hoitoa.

Ensiharvennuspuun korjuu tulee kalliiksi, raaka-aineen hävikki on sekä korjuussa että tehdaskäsittelyssä poikkeuksellisen suuri, ja kaiken lisäksi tuotteen puuteknisiä ominaisuuksia pidetään massa- ja paperiteollisuuden kannalta epäedullisina. Ongelmavyöhyte lienee osittain väistämätön, mutta osaksi se juontaa juurensa toisentyypiselle puutavarralle tarkoitettusta korjuu- ja prosessitekniikasta, epäedullisesta tuotevalikoimasta ja energiakäyttömahdollisuuden puuttumisesta. Raaka-aine, sen käsittely metsässä ja tehtaalla sekä lopputuote eivät sovi yhteen parhaalla mahdollisella tavalla. Vaikeuksien takaa hämmöittää puutavaran ominaisuuksien puutteellinen tuntemus. Vaikka metsäteollisuus raaka-aineen laatua tarkkaillessaan ja raaka-ainevirtoja ohjaillessaan kyllä ottaa tarkoin huomioon puulajien väliset erot, saman puulajin suurikin sisäinen vaihtelu pyrkii jäämään huomioon ottamatta.

Käsillä olevan, ensiharvennusmännyn käytön tehostamiseen tähtäävän tutkimus- ja kehityshankkeen lähtökohtana on, että:

- jalostusketju kannolta tuotteeksi tulee nähdä ja hallita kokonaisuutena
- ensiharvennuspuuta pyritään korjuun alkuvaiheesta lähtien käsittelemään omalla tavaramallinaan mahdollisimman pitkälle, jopa lopputuotteeseen saakka
- tuotesuunnittelussa, laadun ohjauksessa ja prosessisäädöissä otetaan huomioon ja hyödynnetään ensiharvennuspuun erityisominaisuudet.

Siihen, mitä on totuttu pitämään yksinomaan ongelmana, saattaa kätkeytyä myös uusia mahdollisuuksia. Edellytyksenä mahdollisuuksien lunastamiselle on raaka-aineen tuntemus ja kyky ennustaa sen ominaisuuksien vaihtelu. Siksi tutkimuksen tavoitteiksi on asetettu ensinnäkin ensiharvennusmännyn *biomassakoostumuksen ja teknisten ominaisuuksien kartoittaminen* sekä toisaalta ominaisuuksiltaan täten tunnetun *raaka-aineen jakaminen ja ohjaaminen kuitu- ja energiakäyttöön tarkoituksenmukaisella tavalla*.

Tulokset pyritään esittämään siten, että niistä voidaan laskea kuitu- ja energiapuun kertymä ja ominaisuudet erilaisia apteeraus- ja vähimmäisläpimittavaihtoehtoja sovellettaessa sekä suorittaa kuitu- ja energiapuun välinen rajankäynti vastaamaan kulloin-

kin vallitsevaa markkinatilannetta ja käytettävissä olevaa karsinta- ja kuorintatekniikkaa. Näin koottua tietopakettia voidaan hyödyntää laite-, menetelmä- ja tuotekehittelyssä, kertymä-, arvosuhde- ja kustannuslaskelmissa, raakapuuvirtojen ohjailussa ja laadun tasaamisessa, mittauksen muuntoluvuissa sekä vaihtoehtoisten korjuujärjestelmien biomassataseita ja ekologisia seurannaisvaikutuksia arvioitaessa.

Tutkimus on osa vuonna 1993 käynnistynyttä VTT Energian koordinoimaa *kansallista bioenergian tutkimusohjelmaa*. Hanke on rahoitettu osaksi kauppa- ja teollisuusministeriön ja TEKESin sekä osaksi Metsäntutkimuslaitoksen varoin. Metsäntutkimuslaitoksen keskeiset yhteistyökumppanit ovat Metsäteho, Joensuun yliopisto, Finntech Oy, Enso-Gutzeit Oy, Enocell Oy ja Pertti Szepaniak Oy. Metsäntutkimuslaitoksessa hanke kuuluu "Puuvarojen käyttömahdollisuudet" tutkimusohjelmaan.

Tämä julkaisu on käytännön metsätaloutta, metsäteollisuutta ja energiasuunnittelua palveleva kooste Etelä-Suomen (Suomi lukuun ottamatta neljää pohjoisinta metsälautakuntaa) ensiharvennusmänniköitten mahdollisuuksista kuitu- ja energialähteenä. Se rakentuu useasta osaselvityksestä, joita toteutettaessa kirjoittajat ovat saaneet arvokasta asiantuntija- ja järjestelyapua lukuisilta henkilöiltä. Erityisesti haluamme tässä yhteydessä lausua kiitoksemme seuraaville työssä mukana olleille: hankkeen johtoryhmän puheenjohtajat hankintapäällikkö Ahti Ullgrén ja yhteyspäällikkö Kari Kuvaja, metsätal.ins. Jukka Huovinen, aluejohtaja Matti Karjula, metsätal.ins. Tarmo Pesonen ja hankintapäällikkö Ahti Äikäs Enso-Gutzeit Oy:stä; kuorimon ylimestari Jouko Kähkönen ja Pertti Muhonen Enocell Oy:stä; toimitusjohtaja Pertti Szepaniak, kuljetuspäällikkö Pekka Szepaniak ja työnjohtaja Timo Szepaniak Pertti Szepaniak Oy:stä; mh. P.J. Kuitto Finntech Oy:stä; mh., ktm Vesa Imponen, MML Antti Korpilahti, mh. Risto Lilleberg, mh. Olavi Pennanen ja dipl.ins., MMK Kaarlo Rieppo Metsätehosta; MMT Antti Asikainen, prof. Pertti Harstela, metsät.yo. Pasi Niemeläinen, mh. Lauri Sikanen, metsät.yo. Päivi Pulkkinen ja metsät.yo. Tero Vesisenaho Joensuun yliopistosta; hankintapäällikkö Juhani Hämäläinen ja hankintapäällikkö Jorma Solismaa Yhtyneet Paperitehtaat Oy:stä; mh. Olli Laitinen ja aluemh. Markku Melkko Osuuskunta Metsäliitosta; ins. Veli-Juhani Aho VTT Energiasta; sekä metsät.yo. Kyösti Ylijoki Helsingin yliopistosta.

Metsäntutkimuslaitoksessa Tapio Järvinen, Juha Metros, Tapio Nevalainen, Erkki Salo ja Veijo Salo osallistuivat aineiston keruuseen ja käsittelyyn, Satu Kivinen, Jonna Muronranta ja Riikka Piispanen laboratoriotöihin, Leena Muronranta kuvien piirtämiseen, Maija Heino ja Essi Puranen tekstinkäsittelyyn ja toimitustyöhön, Pirkko Kinanen hankkeen sihteerityöhön sekä Hannu Aaltio aineiston laskentaan ja tilastokäsittelyyn. Sakari Salminen luovutti kirjoittajain käyttöön valtakunnan metsien 8. inventoinnin julkaisematonta aineistoa. Käsikirjoituksen tarkastivat osaksi tai kokonaan MMK Mikko Kukkola, MMK Kaarlo Rieppo ja mh Sakari Salminen.

Lausumme kaikille työssä mukana olleille parhaat kiitoksemme.

Vantaalla, marraskuussa 1995

Pentti Hakkila

Hannu Kalaja

Pekka Saranpää

1 Ensiharvennus osana metsänkasvatusta

1.1 Harvennushakkuitten tavoitteet

Puuntuotanto-ohjelmamme selkärankana on järjestelmä, jossa metsikön kehittymistä ohjailaan ja elinvoimaisuutta ylläpidetään toistuvien alaharvennuksin. *Metsikön luonnonmukaista elinkaarta myötäillen poistuma kohdistetaan kasvukyvyltään ja tekniseltä laadultaan heikoimpaan puustoon.* Ensisijaisesti poistetaan kilpailussa alakynteen jääneitä puuyksilöitä mutta laatuharvennuksena myös etukasvuisia susipuita.

Rinnakkaisina tavoitteina ovat puuston elinvoimaisuuden säilyttäminen kasvutilaa väljentämällä, puulajisuhteitten säätöminen, järeyskehityksen kiihdyttäminen sekä puutavaran laadun kohottaminen. Toistuvien harvennuksien myötä pelastetaan talteen muutoin luonnonpoistumaksi hukkaantuvaa puuta, aikaistetaan metsänomistajan tulokertymää sekä luodaan edellytykset koneelliselle korjuulle myöhemmissä hakkuissa. Pitkään jatkuneen harvennuskäytännön ansiosta metsiemme tuottama puutavara on laadukasta ja tervettä, mutta metsikön määrällistä kokonaistuotosta harvennukset tuskin lisäävät.

Suomea vastaavissa ilmasto-oloissa ei missään muualla yllätä lähimainkaan yhtä mittavaan kestävään puuntuotantoon. Harvennushakkuitten merkitystä hakkuumahdollisuuksien kohottajana valaisee Markku Siitosen Metsäntutkimuslaitoksen “Metsäenergia”-julkaisua varten tekemä simulointilaskelma (Hakkila 1992), jossa 55 milj. m³:n vuotuinen hakkuukertymä oletetaan saatavaksi joko vallitsevaa harvennushakkuisiin nojautuvaa metsänhoitokäytäntöä noudattaen tai vaihtoehtoisesti yksipuolisesti päätehakkuin. Harvennukset hylkäävässä vaihtoehdossa puuston liiallinen tihentyminen alkaisi ennen pitkää kostautua luonnonpoistuman lisääntymisenä, järeyskehityksen hiipumisena sekä päätehakkuupuuston korjuukustannusten kohoamisena. Laskentamallin mukaan harvennuksista luopuminen johtaisi vuoteen 2030 mennessä kaikkiaan 500 milj. m³:n tappioon nettotuotoksessa. Tulevien sukupolvien metsäperinnön arvo alenisi 140 miljardilla markalla vuoden 1992 kustannustasolla laskettuna.

Metsätaloutemme ei siis voi luopua kasvatushakkuista, semminkin kun puunkorjuuseen kohdistuvan arvostelun kohteena ovat avohakkuut eivätkä juurikaan harvennukset. Todettakoon kuitenkin, ettei harvennuskäytäntö kaikkialla maailmassa ole itsestäänselvyys. Esimerkiksi Kanadassa, Venäjällä ja suuressa osassa Yhdysvaltoja harvennushakkuilla on vain marginaalinen merkitys, niitä vasta opetellaan. *Harvennushakkuitten osaaminen ja pienikokoisen harvennuspuun hyödyntäminen ovat nimenomaan pohjoismaisen metsätietotaidon tavaramerkki.*

1.2 Ensiharvennuskäytöt

Suomalaisessa metsänhoidossa suositaan tasaikäistä metsikkörakennetta, jonka lähtökohtana voi olla niin luontainen siemennys kuin keinollinen kylvö tai istutus. Tasaikäisyys on luonteenomaista nimenomaan valoavaavalle männylle. Sen taloudellinen kiertokäyri on Suomen oloissa 70-120 vuotta, pohjoisessa pitempi kuin etelässä ja karulla maaperällä pitempi kuin viljavalla.

Männikön nuoruusvaiheessa taimikko perataan ja harvennetaan kerran tai kahdesti, jolloin poistettava raivauspuu jää yleensä tähteenä metsään. Varttunutta taimikkoa harvennettaessa tosin kerätään monesti polttopuuta kotitarvekäyttöön. Näitä markkinapuuta tuottamattomia hoitotoimenpiteitä seuraa ennen pitkää 2 tai 3 kaupallista harvennusta, joista ensimmäisessä saadaan vain kuitu- ja polttopuuta mutta myöhemmissä lisääntyvin osuuksin myös tukkipuuta. Männikön metsätaloudellinen elinkaari päättyy lopulta uudistushakkuuseen, jolloin korjataan pääsato ja perustetaan uusi metsikkö.

Käsillä oleva tutkimus kohdistuu ensimmäiseen kaupalliseen harvennukseen eli ensiharvennukseen Suomen eteläpuoliskon männiköissä. Ensiharvennus tehdään tyypillisesti 25-45 vuoden iällä. Hyötykasvuisilla lehtomaisilla kankailla ja peltonistutusalloilla se voi tapahtua jo hieman varhemmin. Jos ensiharvennus viivästyy, seurauksena on rungon solakoituminen ja altistuminen lumituhoille, elävän latvuston liiallinen supistuminen ja puuston ennenaikainen rappeutuminen. Tulevaisuudessa ensiharvennuksia pyrittäneen myöhäistämään hakkuukertymän paisuttamiseksi ja korjuukustannusten alentamiseksi, mutta edellytyksenä on silloin taimikon harventaminen nykyistä voimakkaammin ja varttuneempana (Harvennushakkuiden... 1992).

Ensiharvennus tehdään Suomessa alaharvennuksena, toisin sanoen poistuma kohdistuu kilpailussa jälkeen jääneisiin yksilöihin. Siihen kytkeytyy kuitenkin myös laatuharvennustavoite, jolloin osa poistumasta koostuu etukasvuisista, oksikkaista, vaurioituneista tai muutoin heikkolaatuisista puista. Laatuharvennuksen ansiosta poistuma kasvaa ja korjuukustannukset alenevat (Lilleberg 1995). Tämän valikoivan harvennuksen ohella avataan koneille hakkuu- ja ajouria, joilta poistetaan systemaattisesti kaikki puut. Korjuutekniikasta sekä tuotos- ja ympäristönäkökohtien painoarvosta riippuen urien leveys on 4-4,5 m ja väli 18-30 m (vrt. Isomäki 1994).

Jos metsien keskimääräinen kiertokäyri olisi etelässä 80 vuotta ja jos kaikki kasvullinen metsämaa olisi kokonaisuudessaan säännönmukaisen talousmetsäkäsittelyn piirissä, vuotuisen ensiharvennusalan tulisi pitkällä tähtäyksellä olla Etelä-Suomessa keskimäärin 144 000 ha. Lähivuosikymmenen ensiharvennustarpeen sanelevat kuitenkin metsiemme nykyinen ikärakenne ja kehityshistoria. Valtakun-

nan metsien 8. inventoinnin mukaan nuorten kasvatusmetsien ala on Etelä-Suomessa 3,5 milj. ha eli 30,4 % metsämaasta. Mäntyvaltaisia niistä on 2,4 milj. ha eli 20,7 % metsämaasta (taulukko 1). Etelä-Suomen nuorten kasvatusmetsien keskimääräinen ikä on 43 vuotta ja rungon keskiläpimitta rinnankorkeudella 13 cm. Pienessä osassa näistä nuorista kasvatusmetsistä ensiharvennus on jo tehty.

Valtakunnan metsien inventointituloksista vuosilta 1986-1992 on johdettu *metsiköittäisten hakkuuehdotusten summa* seuraavalle kymmenvuotiskaudelle. Ensiharvennuskohteet jaetaan siinä hakkuun kiireellisyyden perusteella kolmeen osaan: myöhässä olevat eli heti harvennettavat; ensimmäisen 5-vuotiskauden aikana harvennettavat; sekä toisen 5-vuotiskauden aikana harvennettavat (Metsäntutkimuslaitoksen julkaisematonta materiaalia):

Harvennuksen ajankohta	Etelä-Suomen metsien ensiharvennustarve	
	Mäntyvaltaiset	Muut
	ha/10 vuotta	
Heti (myöhässä olevat)	92 100	137 300
Lähimmällä 5-vuotiskaudella	375 700	259 500
Toisella 5-vuotiskaudella	532 500	208 900
Yhteensä 10-vuotiskaudella	1 000 300	605 700

Etelä-Suomen mäntyvaltaisissa metsissä tulisi seuraavalla kymmenvuotiskaudella tehdä ensiharvennuksia vuosittain keskimäärin 100 000 ha:n alalla. Vähimmäispoistumaksi on luokituksessa edellytetty 30 m³/ha. Olettaen runkopuun keskimääräiseksi poistumaksi 45 m³/ha, tähteeksi jäävä alamittainen puu mukaan lukien, mäntyvaltaisten ensiharvennusmetsien hakkuutarvetta vastaava poistuma on 4,5 milj. m³ vuodessa. Männyn osuus on ehkä kolme neljännestä eli 3,4 milj. m³, ja lisäksi mäntyä kertyy myös kuusi- ja lehtipuuvaltaisten nuorten metsien harvennuksista 15 %:n seossuhteessa 0,5 milj. m³. Tämä suuri määrä, yhteensä 3,9 milj. m³ kuorellista mäntykuitupuuta vuodessa, on seurausta metsiemme ikäluokkajakaumasta, soitten ojituksesta, mäntyä suosineesta metsänuudistamispolitiikasta sekä kasaantuneista ensiharvennusrästeistä.

Etelä-Suomen ensiharvennusmänty on teollisuudelle huomionarvoinen raaka-ainelähde. Esimerkiksi huippuvuonna 1994 sulfaattimassateollisuus käytti pitkäkuituista raaka-ainetta seuraavasti (Metsätilastollinen... 1995):

	Käyttö milj. m ³ /a
Kotimainen mäntykuitupu	9,5
Ulkomainen mäntykuitupu	1,5
Kotimainen kuusikuitupu	1,7
Ulkomainen kuusikuitupu	0,3
Mekaanisen metsäteollisuuden jätepuu	6,8
Yhteensä	19,8

Mäntykuitupuuta hakattiin vuonna 1994 Etelä-Suomessa yhteensä siis lähes 10 milj. m³, jossa on mukana myös ensiharvennuspuuta ja sahatukeista jäänyt latvakuitupuu. Tilanteessa, jossa mäntyä kuiduttavan teollisuuden tuotantokapasiteetti ja raaka-aineen tarve ovat edelleen kasvussa, ensiharvennuskannan lähes 4 miljoonan m³:n hakkuupotentiaali on merkittävä. Sen osuus yksityismetsien mäntykuitupuun hakkuusuunnitteesta on koko maassa keskimäärin 28%. Keski-Pohjanmaan, Keski-Suomen, Pohjois-Savon ja Kainuun metsälautakuntien alueella osuus ylittää 35% (Imponen 1995). Siksi tavoitteeksi tulee asettaa ensiharvennuskannan hyödyntäminen ensisijaisesti kuituraaka-aineena ja vasta toissijaisesti energialähteenä.

Taulukko 1. Etelä-Suomen nuoret kehityskelpoiset kasvatusmetsiköt valtakunnan metsien 8. inventoinnin mukaan vuosina 1986-1992. Metsälautakunnat 0-9 Salmisen (1993), metsälautakunnat 10-15 Metsäntutkimuslaitoksen julkaisemattoman aineiston mukaan.

Metsälautakunta	Ala, 1000 ha	Ikä, a	Puusto, m ³ /ha		Hakkuusuositus, 100 ha		
			Mänty	Kaikki	Heti	Lähin 5-vuotis- kausi	Toinen 5-vuotis- kausi
Mäntyvaltaiset:							
0 Ahvenanmaa	8	34	56	81	1	1	2
1 Helsinki	39	36	57	78	2	8	8
2 Lounais-Suomi	88	40	58	82	11	15	23
3 Satakunta	142	45	54	70	13	30	38
4 Uusimaa-Häme	49	40	56	80	5	8	14
5 Pirkka-Häme	119	39	52	71	8	25	37
6 Itä-Häme	53	38	65	89	6	12	14
7 Etelä-Savo	126	37	62	79	13	21	35
8 Etelä-Karjala	123	35	63	79	12	26	33
9 Itä-Savo	70	34	66	83	7	14	21
10 Pohjois-Karjala	389	45	53	64	31	58	90
11 Pohjois-Savo	254	42	54	71	31	53	58
12 Keski-Suomi	317	39	58	71	19	67	86
13 Etelä-Pohjanmaa	268	51	55	68	13	48	56
14 Pohjanmaa (ruots.)	83	45	54	74	5	12	19
15 Keski-Pohjanmaa	264	54	49	66	15	40	47
0-15 Etelä-Suomi	2 385	43	55	71	191	438	581
Kuusivaltaiset:							
0-15 Etelä-Suomi	754	45	10	106	113	188	181
Lehtipuuvalliset:							
0-15 EteläSuomi	360	38	10	92	97	115	65
Kaikki:							
0-15 Etelä-Suomi	3 449	43	41	81	401	741	827

1.3 Ensiharvennus teknis-taloudellisena ongelmana

Hakkuutilastoissa ei eroteta ensiharvennuksia muista harvennuksista. Siksi takavuosien ensiharvennussuoritetta ei tunneta tarkoin. Sen vain tiedetään jääneen hälyttävän paljon tavoitetason alapuolelle. Valtakunnan metsien 8. inventoinnin mukaan Etelä-Suomen mäntyvaltaisissa metsissä tehtiin ensiharvennuksia edellisen 10-vuotiskauden aikana vuosittain keskimäärin vain 32 000 ha:n alalla, kun taas vastaava tarve on 100 000 ha vuodessa (Metsäntutkimuslaitoksen julkaisematonta materiaalia). Vuonna 1994 ensiharvennushakkuut kääntyivät paperiteollisuuden korkeasuhdanteen ansiosta kuitenkin nousuun.

Ensiharvennuksia ei saada tehdyksi hyvän metsänhoidon ja tapahtuneen jälkeenjäneisyyden edellyttämässä laajuudessa, mikä merkitsee ongelmia nykymuotoiselle metsänkäsittelylle ja puuntuotannolle. Lukuisat haittatekijät näet jarruttavat ensiharvennuspuun korjuuta ja käyttöä kuituraaka-aineena:

1. *Korkeat korjuukustannukset, jotka aiheutuvat puun pienestä koosta, kasvamaan jätettävän puuston suuresta runkoluvusta sekä alhaisesta kertymästä hehtaaria ja koko leimikkoa kohti. Yksioteharvesterien kehittymisen ja korjuun koneellistamisen myötä kustannukset ovat tosin alentuneet myös ensiharvennumänniköissä, mikä onkin elvyttänyt metsäteollisuuden kiinnostuksen. Muihin leimikoihin verrattuna kustannustaso on kuitenkin edelleen korkea. Vuonna 1994 koneyrityksille maksettu kokonaiskorvaus hakkuusta ja metsäkuljetuksesta oli erilaisissa mäntyleimikoissa tasoltaan seuraava:*

Korjuun kustannus, mk/m³

Ensiharvennus	75-90
Muu harvennus	50-65
Päätehakkuu	29-35

2. *Suuri hävikki rumpukuorinnassa, mikä aiheutuu toisaalta ensiharvennuspuun korkeahkosta kuoripitoisuudesta sekä toisaalta ohuitten pölkkyjen murskaantumisesta järeämmän kuitupuun seassa (kuva 1). Kun rumpukuorintahävikkiä on käytännössä vaikea mitata ja kun se lisäksi suuresti vaihtelee laiteratkaisuista, prosessioloista ja raaka-aineen mitta- ja seossuhteista riippuen, todellista puunhukkaa ei edes tunneta. Kustannuslaskelmissa joudutaan tyytymään epämääräisiin arviolukuihin, joissa hävikki varmuussyistä oletetaan usein tarpeettoman suureksi (vrt. Niemeläinen 1992).*

3. *Nuori puu poikkeaa teknisiltä ominaisuuksiltaan myöhempien harvennusten ja päätehakkuitten kuitupuusta, jolle tehdasprosessit on mitoitettu ja säädetty. Kun ensiharvennuspuu sitten sekoittuu epämääräisessä ja ennalta tuntemattomassa satunnaisessa suhteessa tehtaan kuitupuuvirtaan, keittyminen tapahtuu epätasaisesti ja prosessissa syntyy saanto- ja laatutappioita. Ensiharvennuspuun lyhyet, ohutseinäiset nuorpuukuidut heikentävät armeerausmassan ja paperin repäisylujuutta, ja vaikka niillä vastapainoksi on myös joukko edullisia ominaisuuksia, edut jäävät käytännössä hyödyntämättä, ellei ensiharvennuskuitua kyetä ohjaamaan hallituissa seossuhteissa oikeisiin tuotekohteisiin.*

Mitä nuoremasta ja ohuemmasta puusta on kysymys, sitä kärjekkäämpinä nämä kielteiset piirteet korostuvat. Siksi metsäteollisuus nosti lamavuonna 1992 kuitupuun vähimmäislatvaläpimitan aikaisemmasta 6 cm:stä männyllä 7 cm:iin ja kuusella peräti 8 cm:iin. Vähimmäislatvimitarajaa täten nostamalla kalliin ja heikkolaatuisena pidetyn ensiharvennuspuun järeyttä voidaankin kyllä hieman lisätä, mutta kun puu-, hehtaari- ja leimikkokohtainen kertymä samalla supistuu, seurauksena saattaakin itse asiassa olla korjuun yksikkökustannusten kohoaminen entisestään (Imponen 1993).



Kuva 1. Ohut ensiharvennuspuu murskaantuu kuorimarummuissa helposti, jos sitä käsitellään samanaikaisesti järeämmän kuitupuun kanssa.

Näin siis pienikokoisen ensiharvennuspuun korjuu- ja prosessitekniikat pakotetaan järeämmälle kuitupuulle mitoitettuun muottiin raaka-aineen ominaisuuksista piittaamatta. Syntyy ongelmia, joitten voittamiseksi *tekniikkaa tulee kehittää leimikon ja raaka-aineen erityispiirteitä vastaamaan*. Esimerkiksi seuraavat lähestymistavat voivat edistää ensiharvennuspuun hyödyntämistä (Hakkila 1989):

1. *Kuitu- ja energiapuun korjuun integrointi*. Pienestä kuitupuukertymästä koituvia kustannusongelmia vähennetään ottamalla samanaikaisesti talteen paitsi kuidutukseen myös energian tuotantoon soveltuva biomassa. Mahdollisimman suuri osa kertymästä erotetaan laadukkaaksi kuituraaka-aineeksi, ja loppuosa käytetään fossiilipolttoaineita korvaavana uusiutuvana bioenergiälähteenä.
2. *Korjuu kokopuuna oksineen*. Tavoitteeksi asetetaan puun koko maanpäällisen osan hyödyntäminen. Luovutaan puitten karsimisesta metsässä, jolloin biomassakertymä paisuu mutta työkustannukset alenevat. Ekologisista syistä kuitenkin osa latvusmassasta jätetään kasvupaikalle, sillä on varottava vaarantamasta maan ravinnetasapainoa ja ekosysteemin monimuotoisuutta liian perinpohjaisella talteenotolla.
3. *Joukkokäsittely*. Kompensoidaan pienen yksikkökoon kustannusvaikutusta korvaamalla yksinpuinkäsittely joukkokäsittelyllä mahdollisimman aikaisessa korjuuketjun vaiheessa.
4. *Raaka-aineen erityisominaisuuksien hyödyntäminen*. Ensiharvennuspuuta ei ehdoin tahdoin ennen aikaisesti sekoiteta muuhun kuituraaka-aineeseen, vaan sitä pyritään ainakin kuorinnassa ja mahdollisesti vielä kuidutuksessakin käsittelemään omana tasalaatuisena tavaralajinaan sille sovitettua tekniikkaa käyttäen. Ensiharvennuskuitu ohjataan erikoistuotteisiin, joissa sen poikkeavat ominaisuudet ovat edullisimmillaan, tai sekoitetaan tehtaan muuhun kuituvirtaan laadun tasaisuuden varmistamiseksi tarkoin hallitussa suhteessa.

Vuonna 1993 käynnistetyssä kansallisessa bioenergian tutkimusohjelmassa on lukuisia hankkeita, joihin sisältyy edellä kuvattuja tavoitteita. Laite-, menetelmä- ja tuotekehittely sekä eri hankkeitten tulosten vertailu edellyttävät, että raaka-aineen määrä, biomassakoostumus ja tekniset ominaisuudet tunnetaan ja kuitu- ja energiapuun erottaminen toisistaan hallitaan. Kun tarvittava perustietous osaksi puuttuu ja osaksi on sirpaleisena hajallaan, käsillä olevan *tutkimuksen tehtäväksi on asetettu*:

1. Kartoittaa Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköistä saatavissa olevan raaka-aineen potentiaali ja tekniset ominaisuudet sekä vetää raja kuitu- ja energiapuun välille.
2. Kehittää teknisiä ratkaisuja, joilla biomassan kuitu- ja energiakomponentit voidaan erottaa toisistaan ensiharvennuspuun optimaaliseksi hyödyntämiseksi.

2 Ensiharvennuskannan tekniset ominaisuudet

2.1 Tutkimusaineisto ja menetelmä

Tutkimuksen ensimmäisenä osatehtävänä on kartoittaa ensiharvennuskannan teknisten ominaisuuksien vaihtelu rungon sisällä, runkojen välillä sekä leimikoitten välillä kuitu- ja energiapuun välistä rajanvetoa, arvosuhdelaskentaa, laadunhallintaa sekä menetelmä- ja tuotekehittelyä silmällä pitäen. Tätä varten kerätty aineisto sisältää 16 ensiharvennuskannalle, joista 1 edustaa käenkaali-mustikkatyyppiä, 4 mustikkatyyppiä, 9 puolukkatyyppiä ja 2 kanervatyyppiä.

Leimikot painottuvat kuivahkoille VT-kankaille Etelä-Suomen itäosaan. Ensiharvennuskannakoitten hakkuutarve on näet suurin Pohjois-Karjalassa, missä pääosa hankkeen muistakin osatehtävistä toteutettiin yhteistyössä Enso-Gutzeit Oy:n, Enocell Oy:n Pertti Szepaniak Oy:n ja Metsätehon kanssa. Poistettujen puitten keski-ikä oli 33 vuotta, rinnankorkeusläpimitta 11,7 cm, pituus 11,5 m ja *latvusuhde eli elävän latvuksen osuus rungon koko pituudesta* 49 % (taulukko 2).

Taulukko 2. Kuoripitoisuuden, puuaineen ja kuoren tiheyden sekä tuoreen puun kosteuden kartoittamiseen käytetty ensiharvennuskannan leimikkoaineisto. Harvennuksessa poistetun puuston ominaisuuksia.

Leimikon nro	Paikkakunta	Metsätyyppi	Ikä, a	D _{1,3'} , cm	Pituus, m	Latvusuhde, %
1	Tuusula	VT	34	10,8	10,9	44
2	Lapinjärvi	VT	29	12,3	11,7	49
3	Kitee	VT	28	10,5	10,8	46
4	Kontiolahti	VT	43	11,3	14,5	41
5	Parkano	VT	41	12,7	12,9	42
6	Vesijako	VT	27	11,6	11,4	52
7	Vilppula	MT	25	13,4	11,2	43
8	Ruokolahti	VT	27	10,9	9,7	57
9	Ruokolahti	MT	31	11,9	12,4	46
10	Savonlinna	VT	40	12,1	12,8	43
11	Lieksa	VT	47	12,5	12,1	54
12	Lieksa	MT	30	9,5	8,9	58
13	Lieksa	CT	41	11,6	10,8	54
14	Lieksa	CT	32	10,1	9,3	58
15	Juva	MT	31	12,8	13,6	41
16	Tammela	OMT	24	12,9	11,2	50
Keskim.			33	11,7	11,5	49

Kustakin leimikosta kaadettiin 15 koepuuta. Ne valittiin satunnaisen keskipisteen ympäriltä siten, että 10 puuta oli peräisin tyypillisestä alaharvennuspoistumasta ja loput 5 muusta puustosta. Viimeksi mainitut oli tarkoitettu edustamaan poistumaa ajourilta sekä osaksi myös ennakoimaan siirtymistä kohti voimakkaampia harvennuksia.

Koepuita oli kaikkiaan 240. *Kustakin koepuusta sahattiin näytekiekkoja metrin välein* alkaen 0,5 m:n etäisyydeltä kantoleikkauksesta ja jatkaen aina siihen saakka, kunnes rungon läpimitta kapeni puun latvassa noin 1,5 cm:iin. Kiekkoja, joitten paksuus vaihteli läpimitasta riippuen 3 ja 10 cm:n välillä, kertyi noin 2500 kappaletta.

Kiekot suljettiin muovipusseihin ja varastoititiin kylmäkaappiin. Laboratoriossa tehtiin seuraavat mittaukset: kuorellisen kiekon punnitus tuoreena, kuoren ja kuorettoman kiekon erillinen punnitus kuivana, kuorellisen ja kuorettoman tuoreen kiekon halkaisijan ristiinmittaus, luston keskimääräisen leveyden mittaus sekä kuorellisen ja kuorettoman kiekon tilavuuden määrittäminen punnitsemalla ilmassa ja veteen upotettuna. Näitten mittausten perusteella kustakin kiekosta laskettiin:

- Kuorellisen puun kosteus
- Luston paksuus
- Kuoren paksuus
- Kuoren tilavuusprosentti
- Kuoren kuivamassaprocentti
- Kuorellisen puun tuoretiheys
- Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys
- Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys
- Kuoren kuiva-tuoretiheys

Kiekoittaiset mittaustulokset osoittavat *muuttujain vaihtelun rungon pituussuunnassa*. Niistä laskettiin edelleen *kullekin puulle tilavuudella painotetut runkokohittaiset keskiarvot*. Rungoittaiset tulokset käsiteltiin askeltavalla regressioanalyysillä, ja niille laskettiin *leimikkokohtaiset keskiarvot rungon tilavuudella painottaen*. Leimikoittaisten keskiarvojen vaihtelua selitettiin regressioanalyysillä niinikään.

Edellä kuvattujen ominaisuuksien lisäksi leimikoissa 1, 4, 12, 15 ja 16 tutkittiin myös *asetoniin liukenevien uuteaineitten määrää* kuorettomassa puuaineessa. Tarkoitusta varten kustakin leimikosta kaadettiin 10 puuta, joista sahattiin kiekko seuraavilta korkeuksilta: 1,5 m, 3,5 m, 5,5 m ja 7,5 m. Kuorituista kiekkoista erotettiin pinnasta ytimeen ulottuva sektori, joka palastettiin pieniksi tikuiksi, kuivattiin 48 tunnin ajan 60°C lämpötilassa ja jauhettiin lopulta Cyclotech-myllyllä hienoksi jauheeksi. Uuteainepitoisuus määritettiin 3,0 g:n jauhe-erästä. Jokainen uutto toistettiin. Uuttojen kokonaismäärä oli kaikkiaan 400.

Näytteet uutettiin asetonilla Büchin uuttolaitteella. Puujauhoa pidettiin selluloosa-hylsyssä laitteen alaosan kolvissa kiehuvasa asetonissa 1,5 tunnin ajan ja sen jälkeen yläasennossa puolen tunnin ajan, jolloin näyte huuhtoutui muutaman kerran asetonilla. Kun tätä nopeutettua kuumauuttoa verrattiin tavanomaiseen kuusi tuntia kestävään Soxhlet-uuttoon, tulos oli 97 % Soxhlet-uuton tuloksesta. Ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

Lisäksi tutkittiin *kuidun pituutta* leimikossa nro 11. Yhteensä 13 rungosta analysoitiin eri korkeuksilta kaikkiaan 72 näytekiekkoa. Kustakin kiekosta sahattiin ytimestä pintaan ulottuva kapea sektori, joka jaettiin kahteen osaan: ytimen ympärillä 3 cm:n säteellä oleva nuorpuuvyöhyke sekä sen ulkopuolinen normaali puuta vastaava vyöhyke. Yhteensä tutkittiin 117 näytettä.

Nämä näytteet paloiteltiin tulitikun kokoisiksi ja maseroitiin Franklinin (1945) menetelmällä säilyttämällä niitä yli yön jääetikan ja väkevän vetyperoksidin (1:1) liuoksessa 60°C lämpötilassa. Kun tikkuja sitten sekoitettiin koeputkessa varovasti lasisauvalla, kuidut irtosivat toisistaan, ja ne voitiin pestä ja kerätä sauvalla objektilasille. Kustakin näytteestä mitattiin kuvantulkintaohjelman avulla sadan satunnaisesti valitun *ehjän trakeidin pituus*.



Kuva 2. Ensiharvennumänniköistä korjattua kuitupuuta Enocell Oy:n tehdasvarastolla rumpukuorintaa odottamassa.

2.2 Kuoren määrä

Kuorella on keskeinen asema kuitupuun ja energiapuun välisessä rajanvedossa. Ensiharvennuspuun arvo ja soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin riippuvat kuoripitoisuudesta ja kuorimisen vaikeudesta.

Puun kuori koostuu *elävästä sisäkuoresta eli nilasta ja ulkokuoresta*. Kuoren ja puun välissä sijaitseva jälsi tuottaa sisäpuolelleen puuainetta ja ulkopuolelleen nilaa, jota pitkin puu kuljettaa yhteyttämistuotteita latvuksesta runkoon ja juuristoon. Kuoren kasvaessa paksuutta nilakerroksen uloimpaan ja vanhimpaan osaan kehittyy korkkijälsi, joka tuottaa korkkisolukon muodostamaa ulkokuorta. Korkkijäljen ulkopuoliset solukot jäävät ilman ravintoa ja kuolevat. Rungon paksuus-kasvun seurauksena ulkokuoren uloimpaan osaan syntyy halkeamia, ja sileä hilsekuori muuttuu rungon tyvipäässä rosoiseksi kaarnaksi.

Useimmissa tutkimuksissa *kuoren osuus lasketaan kuorellisen puun kokonaistilavuudesta*. Se voidaan määrittää esimerkiksi mittasaksilla, ksylometrillä tai kuoren läpi painettavalla mittarilla. Eri menetelmät saattavat antaa erilaisia tuloksia. Tilavuusosuus riippuu myös kuoren kosteudesta, sillä kuivuessaan kuori painuu kokoon huomattavasti puuainesta enemmän. Kutistuminen on voimakkainta nilassa, jonka osuus on suurin puun latvassa. Kun männyn kuoren kosteus laskee tuoreesta absoluuttisen kuivaksi, kuoren tilavuus kutistuu puun paksukaarnaisella tyvellä 19-28 % mutta ohutkuorisessa latvassa peräti 51-64 % (Tamminen 1962). Männyn puuaineessa tilavuuskutistuma tuoreesta absoluuttisen kuivaksi on vastaavasti vain 12,4 % (Jalava 1952).

Olkkoon kysymyksessä sitten kuitu- tai energiakäyttö, usein on itse asiassa hyödyllisempää tuntea *kuoren osuus kuorellisen puun kokonaiskuivamassasta*. Esimerkiksi kuidutukseen käytettävälle hakkeelle asetettu kuoripitoisuuden enimmäisraja, sulfaattimassateollisuudessa yleensä 1 %, viittaa nimenomaan osuuteen kuivamassasta. Samoin, kun seurataan erilaisista biomassakomponenteista koostuvia raaka-ainevirtoja, kuivamassa on tarkoituksenmukaisin laskentaperuste. Männyn kuoren kuivamassaosuutta on selvitelty aikaisemmin muun muassa Metsäntutkimuslaitoksen Vesijaon tutkimusalueelta kerätystä aineistosta (Hakkila 1967), mutta tulokset eivät edusta ensiharvennusmänniköitä.

Lukuun 2.2 on koottu käytännön toiminnassa ja arvosuhdelaskelmissa tarvittavia tietoja ensiharvennusmännyn kuoren paksuuden, tiheyden, tilavuusosuuden ja kuivamassaosuuden vaihtelusta. Niitä lähtökohtana käyttäen saadaan tapauskohtaisesti kuva kuoren tilavuus- ja kuivamassaosuuksista käyttöpuun vähimmäisläpimitasta riippuen. Huomattakoon, että *tulokset edustavat pystypuustossa ennen korjuutapahtumaa vallitsevaa tilannetta* eivätkä suoranaisesti käyttöpaikalle saapuvaa puutavaraa, josta korjuun ja kuljetuksen eri vaiheissa aina häviää kuorta

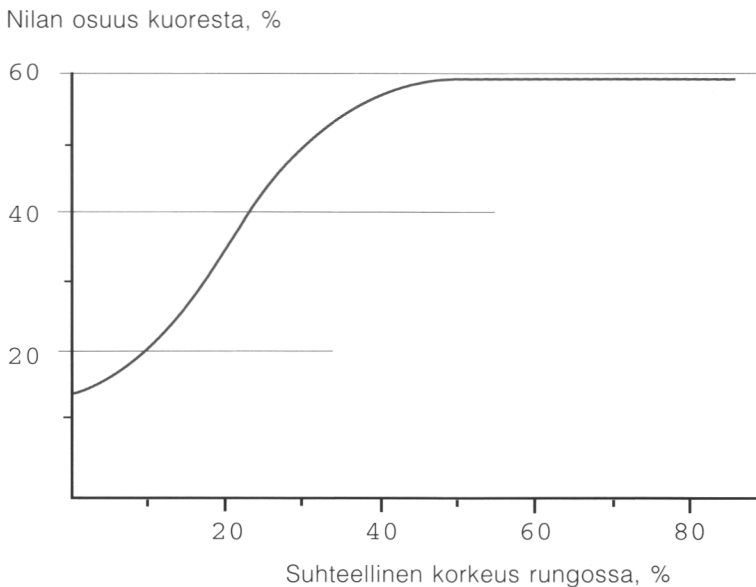
olosuhteista ja menetelmistä riippuen. Erityisesti yksioteharvestereitten syöttö- ja karsintalaitteet rouhivat ja veistävät kuorta jo puutavaraa valmistettaessa, niin että koneellisesti korjatussa puutavarassa kuoripitoisuus on selvästi pienempi kuin metsurin tekemässä.

2.2.1 Kuoren määrän vaihtelu rungon pituussuunnassa

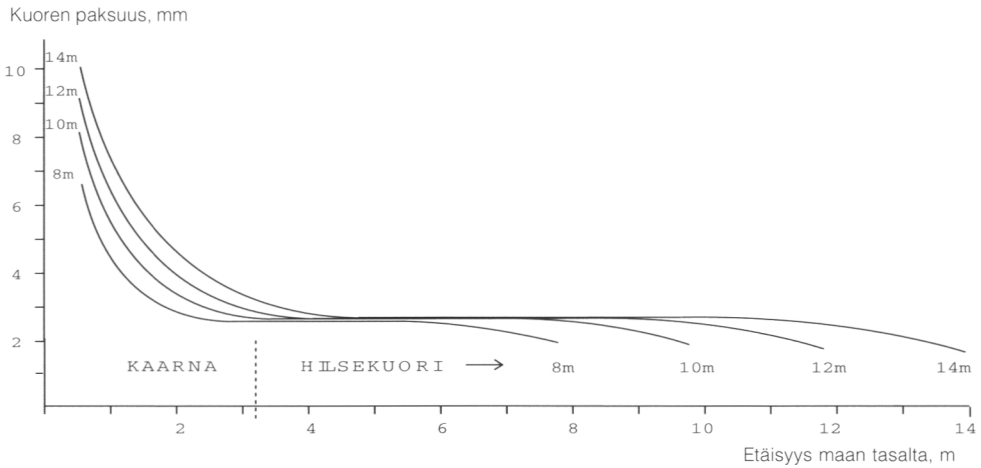
Ulkokuoren tehtävänä on rungon suojaaminen. Koska suojan tarve tulta ja eläimiä vastaan on suurin maanrajassa, ulkokuori on paksuimmillaan puun tyvellä ja ohentuu sitten nopeasti kohti latvaa. Nila sen sijaan yhteyttämistuotteittenkulkuväylänä säilyttää 1-2,5 mm:n paksuuden verraten tasaisena kautta koko rungon.

Nilan suhteellinen osuus kuoren kaikesta kuivamassasta kasvaa niin ollen latvaa kohti. Kun nilan osuus on tyven rosokaarnassa vain 15 %, on se rungon yläpuoliskossa jo 60 % (kuva 3). Kuoren koostumuksella on tärkeä merkitys massateollisuudessa, sillä paksun rosokaarnan tiivisrakenteiset, runsaasti suberiinia sisältävät solukot liukenevat keitossa huonon läpäisykykynsä vuoksi vaikeasti. Ne jättävät massaan epäpuhtauksia paljon herkemmin kuin latvan ohut ulkokuori tai nila.

Kuoren paksuus on rungon läpimitasta riippuen rungon tyvellä tyypillisesti 7-11 mm, mutta yksityistapauksissa tyvikaarna saattaa olla paljon paksumpaakin. Se ohenee nopeasti latvaa kohti muuttuen jo 2-4 m:n korkeudella 2-3 mm:n paksuiseksi nilavoittoiseksi hilsekuoreksi. Sen jälkeen paksuus säilyy miltei muuttumattomana noin 6 cm:n runkoläpimitaan saakka. Sitten se ohenee jälleen (kuva 4).



Kuva 3. Nilan osuus kuoren kuivamassasta mäntyrungon eri korkeuksilla (Hakkila 1967).



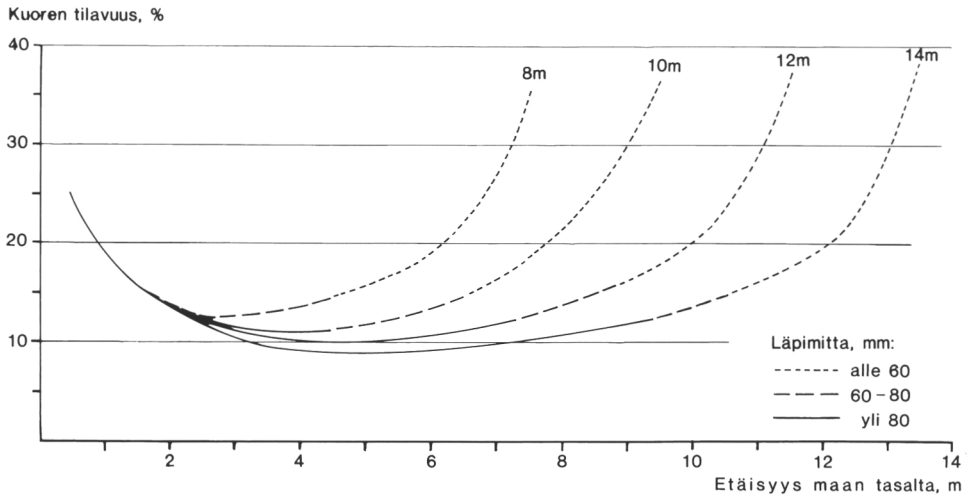
Kuva 4. Kuoren paksuuden vaihtelu rungon pituussuunnassa 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennuskannikoissa.

Kuoren tilavuusosuus on kantoleikkauksen yläpuolella keskimäärin 25 %. Se supistuu latvaa kohti ensiharvennusleimikossa suunnilleen 5 m:n tyvipölkyn mitan, minkä jälkeen se rungon koosta riippuen on alimmillaan 8-12 %. Kun kuoren ohentuminen on tästä ylöspäin vähäistä, tilavuusosuus kääntyy puun latvaa kohti taas nousuun. Missä rungon läpimitta alittaa kuitupuun nykyisen 7 cm:n vähimmäisläpimitan, kuoren tilavuusosuus on 12-14 %. Siitä ylöspäin osuus kasvaa jyrkästi ja ylittää latvan kärjen tuntumassa jo 30 %. Rungon pituussuuntaista muutosta kuvaavat mallikäyrät ovat kaikissa ensiharvennuskannikoissa perusmuodoltaan samanlaiset, mutta lyhyessä puussa kuorta on suhteellisesti enemmän ja muutokset tapahtuvat jyrkempinä kuin pitkässä puussa (kuva 5).

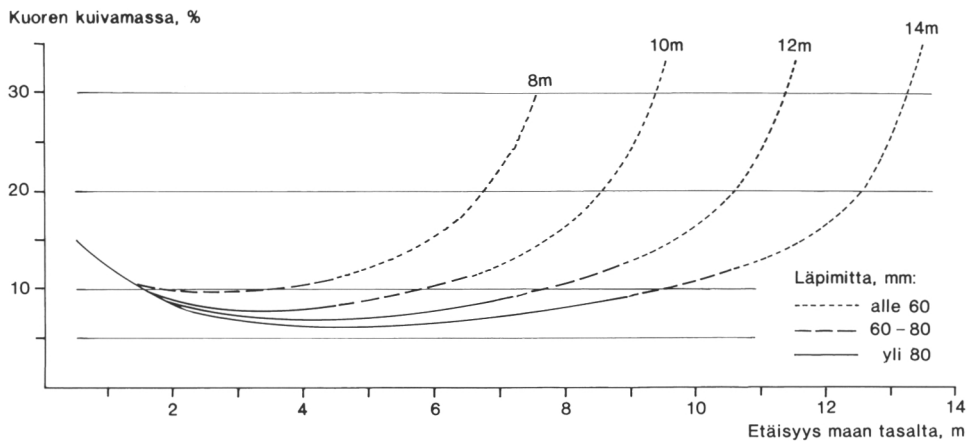
Kuoren kuiva-tuoretiheys on tutkimusaineiston ensiharvennuskannikoissa keskimäärin vain 267 kg/m^3 . Rungon pituussuuntainen vaihtelu on vähäistä, eikä rosoja ja hilsekaarnan välillä ole juurikaan eroja. Vain aivan ylimmässä markkinakelvottomassa latvaosassa kuiva-tuoretiheys nousee noin 10 kg/m^3 runkokeskisarvon yläpuolelle. Tulos on yhdenmukainen Tammisen (1962) aikaisempien havaintojen kanssa. Se on alhaisempi kuin Kärkkäisen (1976a ja b) mitaamat 305 kg/m^3 mäntytukkien kuorelle ja 311 kg/m^3 rinnankorkeusläpimitaltaan 15 cm:n mäntyjen oksien kuorelle.

Kuoren kuivamassaosuus määräytyy kuoren tilavuusosuuden, kuoren tiheyden sekä puuaineen tiheyden pohjalta. Ensiharvennuskannikoiden kuoren tiheys on keskimäärin vain 67 % puuaineen tiheydestä, joten kuoren kuivamassaosuus on vastaavasti keskimäärin kolmanneksen pienempi kuin tilavuusosuus. Ero ei kuitenkaan ole samansuuruinen rungon kaikissa osissa, vaan se supistuu tyvestä latvaa kohti. Syynä on puuaineen tiheyden aleneminen latvaa kohti samalla kun kuoren tiheys säilyy lähes muuttumattomana.

Puolen metrin etäisyydellä ensiharvennusmännyn kantoleikkauksesta kuoren kuivamassaosuus on keskimäärin 15 %. Se alenee 35 %:n runkokorkeudelle saakka, jolloin kuorta on vain 6-8 % kuorellisen puun kuivamassasta, aivan pienimmissä ensiharvennusmännnyissä hieman enemmän. Sitten se kääntyy kasvuun ja on 9-11 %, kun rungon läpimitta alittaa 7 cm (kuva 6).



Kuva 5. Kuoren tilavuusosuuden vaihtelu rungon pituussuunnassa 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköissä.



Kuva 6. Kuoren kuivamassasuuden vaihtelu rungon pituussuunnassa 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköissä.

2.2.2 Kuoren määrän vaihtelu runkojen välillä

Pienestä runkokoosta johtuen ensiharvennumännissä on kuorta enemmän kuin myöhemmistä harvennuksista ja päätehakkuista saatavassa puutavarassa. Runkojen välistä vaihtelua selittävät parhaiten kuoren paksuuden osalta rinnankorkeusläpimitta ja tilavuus- ja kuivamassaosuuden osalta rungon pituus:

Rungoittaista vaihtelua selittävä runkotunnus	Kuoren paksuus	Kuoren tilavuusosuus	Kuoren kuivamassaosuus
	Korrelaatiokerroin (r)		
$D_{1,3}^2$	+0,631	-0,263	-0,454
Pituus	+0,169	-0,464	-0,655
Ikä ²	+0,024	-0,201	-0,285
$(D_{1,3}/ikä)^2$	+0,513	-0,083	-0,212

Rungottaisen vaihtelun tunteminen auttaa ymmärtämään, miten leimikon sisäinen rakenne vaikuttaa puutavaran kuoriosuuteen. Voidaan arvioida, mitä esimerkiksi pienimpien puitten hylkääminen, ajourapuut, harvennuspoistuman lisääminen, tai harvennuksen myöhäistäminen vaikuttavat kertymän kuoripitoisuuteen. Kuoren määrää voidaan ennustaa runkokohtaisesti seuraavilla regressioyhtälöillä, mutta selitysaste jää vaatimattomaksi.

	R ²	Hajonta käyrältä
$y_1 = 2,83 + 0,0100x_1^2$	0,40	0,85 mm
$y_1 = -0,65 + 0,669x_1 - 0,0120x_1^2 - 0,0092x_2^2 + 0,067x_1/x_2$	0,56	0,74 mm
$y_2 = 22,55 - 0,60x_2$	0,22	2,14 %
$y_3 = 4,57 + 63,16/x_2$	0,44	1,06 %
$y_3 = 5,47 + 67,26/x_2 - 0,022x_3 - 0,14x_1/x_2^4$	0,46	1,04 %

y_1 = kuoren keskimääräinen paksuus koko rungossa, mm

y_2 = kuoren tilavuusosuus koko rungossa, %

y_3 = kuoren kuivamassaosuus koko rungossa, %

x_1 = puun $D_{1,3}$, cm

x_2 = puun pituus, m

x_3 = puun latvussuhde, %

x_4 = puun ikä, a

Harvennuksessa kasvamaan jätettävissä puissa kuori on keskimäärin 0,3 mm paksumpi, sen tilavuusosuus 1,4 prosenttiyksikköä alhaisempi ja sen kuivamassaosuus 0,7 prosenttiyksikköä alhaisempi kuin alaharvennusperiaatteen mukaan poistettavissa puissa. Ajourapuut ja laatuharvennuspoistuma hieman alentavat kuitupuukertymän kuoriosuutta.

2.2.3 Kuoren määrän vaihtelu leimikoitten välillä

Rungoittaisessa aineistossa luvussa 2.2.2 kaikki puut saavat koostaan riippumatta saman painoarvon. Leimikoittaiset tulokset sen sijaan ovat rungon tilavuudella painotettuja keskiarvoja.

Leimikoitten välillä hajonta on tietenkin oleellisesti pienempi kuin yksityisten runkojen välillä. Kuoripitoisuus voidaan ennustaa leimikkokohtaisesti luotettavammin kuin runkokohtaisesti:

	Leimikoittainen keskiarvo	Hajonta leimikoitten välillä	Hajonta, % keskiarvosta
Kuoren paksuus, mm	4,5	0,4	8,6
Kuoren tilavuus, %	15,4	1,4	8,8
Kuoren kuivamassa, %	10,1	0,9	9,3
Kuoren kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	267,0	16,7	6,3

Leimikoittaista vaihtelua selittävät samat runkomuuttujat kuin rungoittaistakin vaihtelua. Kuoren paksuuden osalta korrelaatiot ovat heikkoja mutta kuoriosuuden osalta vahvempia. Kuoren kuivamassaosuus korreloi rungon koko- ja ikämuuttujien kanssa tilavuusosuutta kiinteämmin. Rungon pituus on tehokkaampi selittäjä kuin läpimitta:

Leimikoittaista vaihtelua selittävä runkotunnus	Kuoren paksuus	Kuoren tilavuusosuus	Kuoren kuivamassaosuus
	Korrelaatiokerroin (r)		
1/D _{1,3}	-0,382	+0,394	+0,408
Pituus	+0,061	-0,687	-0,777
Ikä ²	+0,010	-0,306	-0,521
D _{1,3} ² /ikä	+0,256	-0,052	+0,159

Kuoren paksuuden leimikkokohtaisen vaihtelun selittämiseksi ei löydy käyttökelpoista yhtälöä. Kuoriosuutta sen sijaan selittää leimikosta poistettavien puitten keskipituus niin tehokkaasti, että hajonta regressiokäyrältä on kuoren tilavuusosuudella 1,02 ja kuivamassaosuudella vain 0,61 kuoriprosenttiyksikköä. Poistettavan runkopuun kuoripitoisuus voidaan siis arvioida melko tarkkaan, mutta on huomattava, että kuoripitoisuus alenee korjuuprosessin aikana.

Jos ensiharvennumännikön keskipituus hakkuuhetkellä nostetaan nykyisestä 11 m:stä tavoitteen mukaisesti 13 m:iin, poistettavan puuston kuoren tilavuusosuus supistuu leimikkokohtaisten yhtälöitten mukaan 15,7 %:sta 14,5 %:iin. Kuoren kuivamassaosuus supistuu vastaavasti 10,4 %:sta 9,4 %:iin.

	R ²	Hajonta käyrältä
$y_1 = 6,06 - 17,672/x_1$	0,15	0,38 mm
$y_2 = 18,95 - 0,02655x_2^2$	0,47	1,02 %
$y_3 = 12,86 - 0,02071x_2^2$	0,60	0,61 %
$y_3 = -6,47 + 104,08/x_1 + 0,1245x_4 + 285,6x_1/x_4^2$	0,54	0,71 %

y_1 = kuoren keskimääräinen paksuus leimikossa, mm

y_2 = kuoren tilavuusosuus leimikossa, %

y_3 = kuoren kuivamassaosuus leimikossa, %

x_1 = poistettavien puitten keskimääräinen $D_{1,3}$, cm

x_2 = poistettavien puitten keskimääräinen pituus, m

x_4 = poistettavien puitten keskimääräinen ikä, a

Yhtälöistä viimeinen osoittaa läpimitan ja kasvunopeuden leimikkokohtaisen yhteisvaikutuksen. Esimerkiksi 30-vuotiaasta ensiharvennusmänniköstä poistettavan puuston kuoren kuivamassaosuus on 10,8 %, kun keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta on vain 10 cm. Jos läpimitta on jo 15 cm, mikä viljavalla kasvupaikalla ja harvalla kasvatusasennolla saattaa olla mahdollista, kuoren kuivamassaosuus on yhtälön mukaan vain 9,0 %.



Kuva 7. Ensiharvennusmänniköstä korjattua karsimatonta osapuuta tehdasvarastolle saapumassa.

2.3 Puuaineen kuiva-tuoretiheys

Puun tuoretiheys osoittaa puuaineen ja veden yhteenlasketun massan tilavuusyksikköä kohti. Puun kuiva-tuoretiheys osoittaa vastaavasti pelkän puuaineen kuivamassan tuoreessa tilassa mitattua tilavuusyksikköä kohti. Tiheyden yksikkö on kg/m³.

Puun kuiva-tuoretiheys on tärkein virheettömän puun laadun tunnus. Se antaa kuvan sekä saha-, kuitu- että energiapuun käyttöominaisuuksista. Se on myös muuntoluku, jolla tilavuus- ja massamitat voidaan muuntaa toisikseen. Siksi se on keskeinen selvityskohde tutkimuksessa, jonka tavoitteena on kuitupuun laadun vaihtelun kartoittaminen, kuitu- ja energiapuun välinen rajanveto ja raaka-ainetaseitten laskenta.

Seuraavat tekijät määräävät kuiva-tuoretiheyden: solun seinämien tilavuus suhteessa soluonteloitten ja solujen välisten tyhjien tilojen tilavuuteen, solun seinämä-aineen tiheys sekä puussa varsinaisten rakennusaineitten lisäksi läsnä olevat muut aineet kuten esimerkiksi pihka. Kuivatutuoretiheyteen vaikuttavat siten solulajien runsaussuhteet, solujen läpimitta ja pituus, solun seinämien paksuus ja kerrosrakenne sekä elävien solujen kuten pihkatiehyitten epiteelisolujen sisältämät uuteaineet ja mineraalit. Koska kuori poikkeaa rakenteeltaan puuaineesta, kuorettoman ja kuorellisen puun kuiva-tuoretiheyksissä on oleellinen ero. Kuitupuun laatua kuvastaa selkeämmin kuorettoman puun tiheys, energiapuun laatua taas kuorellisen puun tiheys.

Kuutiometreinä mitattu puunkulutus on sekä massan valmistuksessa että lämmön tuotannossa lähes suoraan verrannollinen kuiva-tuoretiheyteen. Keittoprosessista riippuen valkaistun sulfaattimassan saanto on noin 46-47 % ensiharvennumännyn kuivamassasta. Mitä tiheämpää puu on, sitä pienempi on kulutus tilavuusyksikköinä. Koska paksuseinäiset kesäpuusolut sisältävät suhteellisesti hieman vähemmän ligniiniä ja enemmän selluloosaa kuin ohutseinäiset kevätpuusolut, ja koska kesäpuun selluloosafibrillit vahingoittuvat sellunkeitossa vähemmän, puunkulutus saattaa tiheyden kasvaessa supistua ehkä enemmänkin kuin kuiva-tuoretiheyden muutos suoranaisesti osoittaa. Riippuvuussuhdetta kuitenkin heikentää vaihtelu pihkan ja muitten uuteaineitten määrissä, joten puun kulutus sellua keitetessä on arvioitavissa tarkimmin uutetun puuaineen tiheyden perusteella. Ensiharvennumännyn uuteainepitoisuus on kuitenkin vain 3 % ja vaihtelee niukasti, joten sen vaikutus tiheyteen ei ole suuri.

Koska puuaineen tiheyden vaihtelu tietyn puulajin puitteissa heijastaa solurakenteessa, erityisesti solunseinämän paksuudessa ja kuidun pituusmassasuhteessa ilmeneviä eroja, se antaa viitteitä myös puun käyttäytymisestä sellua keitetessä. Kevyt ohutseinäinen puuaines absorboi vettä ja kemikaaleja herkemmin kuin tiheä paksuseinäinen puuaines ja keittyy niin ollen nopeammin. Kun keittoerän hake sisältää sekä kevyttä että tiheää puuainesta, keittonesteen imeytyminen etenee epätasaisesti, ja osa raaka-aineesta joko ali- tai ylikeittyy. Aiheutuu saanto- ja laatutappioita.

Solunseinämän paksuuden indikaattorina kuiva-tuoretiheys antaa kuvan kuitujen paperiteknisistä ominaisuuksista. Seinämän paksuus suhteessa solun halkaisijaan määrää kuidun luontaisen litistymistäipumuksen, jota voidaan edelleen manipuloida massan jauhatuksella. Kemiallisen koostumuksen ja kuidun ulkoisten dimensioitten ohella juuri *kuidun litistymistäipumus on paperin lujuus-, bulkki- ja optisten ominaisuuksien kannalta ratkaisevan tärkeä*, ja sen hallitsematon vaihtelu aiheuttaa epätasaisuutta paperin ominaisuuksiin.

Jos paperilta vaaditaan suurta veto-, puhkaisu- tai taittolujuutta, laadullisesti parhaan tuloksen antavat helposti kokoon lysähtävät ohutseinäiset solut eli kevyt puuaines. Litistytessään ohutseinäiset kuidut muodostavat tiiviin, läpikuultamattoman ja sileäpintaisen paperiarkin. Kun paksuseinäisten solujen osuus kasvaa, massan jauhatusaika pidentyy, valkaisutarve lisääntyy ja arkinmuodostus vaikeutuu. Massan saanto, paperin bulkki sekä armeerausmassoille ja monille paperilaaduille ja nopeille paperikoneille oleellisen tärkeä repeämislujuus sen sijaan kasvavat samanaikaisesti.

Eräitten paperilaatujen ominaisuuksille on siis eduksi tiheä puuaines, toisten taas kevyt. Esimerkiksi voimapaperilta vaaditaan korkeata repeämislujutta, jolloin tiheä puuaines antaa parhaan tuloksen, mutta ohuitten läpikuultavien hienopaperien laatu taas hyötyy kevyestä puuaineksestä. Tämä näennäinen ristiriita ei mitätöi kuiva-tuoretiheyden käyttökelpoisuutta kuitupuun laadun tapauskohtaisena tunnuksena. Päinvastoin, kun tunnetaan toisaalta kuidun ominaisuuksien merkitys eri paperilaaduissa ja toisaalta eri raaka-ainelähteistä saatavan puutavaran kuituominaisuudet, voidaan myös puutekniset näkökohdat ottaa huomioon raaka-ainevirtojen ohjailussa ja sekoittamisessa, prosessisäädöissä, massan laadun hallinnassa ja tuotesuunnittelussa. Haluttaessa avautuu myös mahdollisuus ensiharvennuskannan hyödyntämiselle erityispiirteisenä markkinamassalaatuna ja sen ohjaamiselle erikoistuotteisiin. Raaka-ainetta voidaan jopa lajitella tehdasvarastolla tätä tarkoitusta silmällä pitäen.

2.3.1 Tiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa

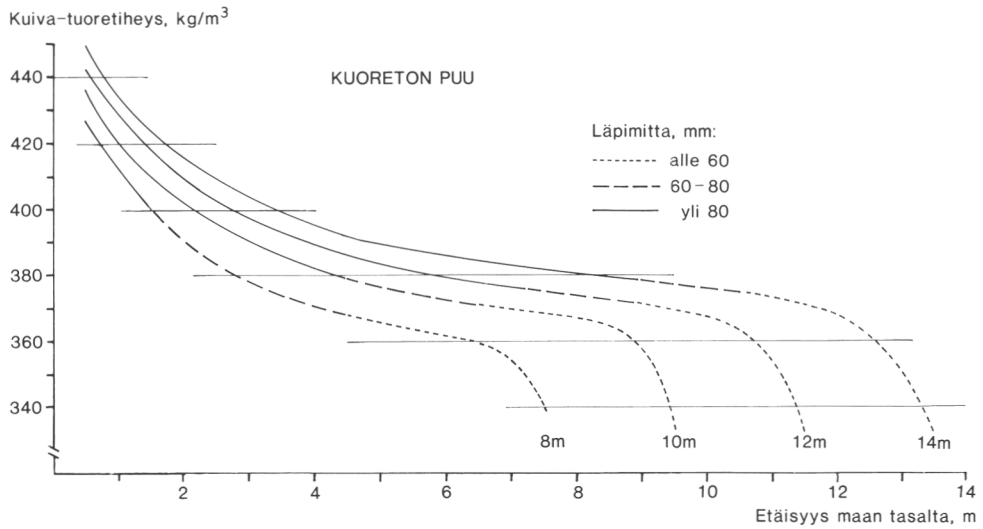
Solun läpimitta ja seinämän paksuus kasvavat rungon ydintä ympäröivästä nuorpuuvyöhykkeestä puun pintaa kohti. Kasvifysiologisesti muutos liittyy jälsikerroksen ikääntymiseen tietyllä rungon korkeudella eikä esimerkiksi ympäristötekijöihin. Tämä nuorpuuilmiö on männyllä voimakkaampi kuin kuusella ja koivulla.

Ilmiöstä seuraa, että männyn puuaineen keskimääräinen tiheys on korkeimmillaan rungon tyvellä, missä vuosilustojen lukumäärä on suurin. Tiheys laskee latvaa kohti aluksi jyrkästi, mutta muutos hidastuu 2-3 m:n korkeudelta lähtien. Aivan ylimmässä markkinakelvottomassa latvassa, missä ohutseinäisistä kuiduista koostuva nuorpuuvyöhyke peittää koko poikkileikkauspinta-alan, puuaineen tiheys laskee jälleen jyrkästi.

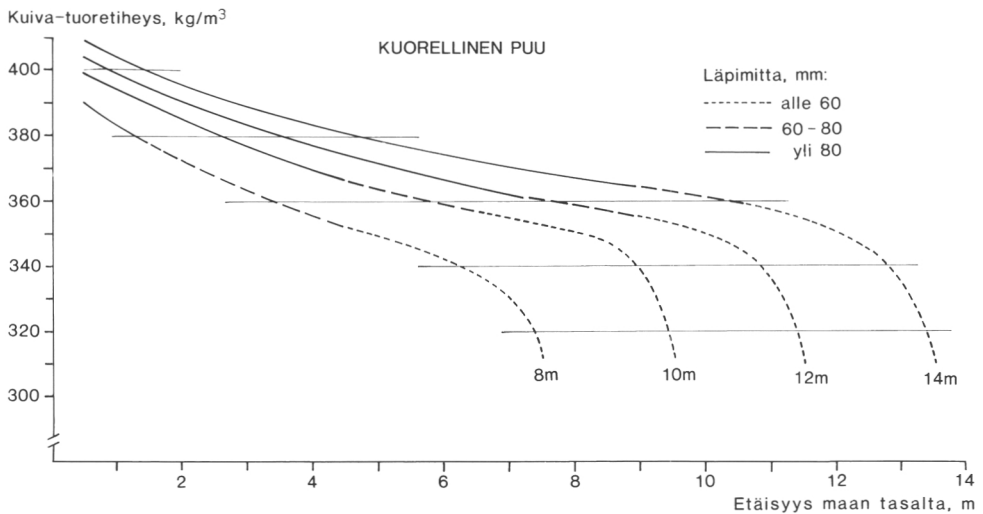
Vaihtelumalli on kaikissa mäntyrungoissa sama, mutta pienemmissä puissa tiheyskäyrät kulkevat kautta linjan alemmalla tasolla kuin suuremmissa (kuvat 8 ja 9), mikä paljolta on seurausta puitten ikäeroista. Aikaisemmin on osoitettu, että niin männyllä, kuusella kuin koivullakin rungon 25 %:n korkeudelta mitattu kuiva-tuoretiheys vastaa koko rungon keskimääräistä kuiva-tuoretiheyttä (Hakkila 1966). Keskimääräinen kuiva-tuoretiheys voidaan arvioida regressioyhtälöllä myös rinnankorkeudelta otetusta kairanlastunäytteestä (Hakkila 1979).

Pienimpiä puita lukuun ottamatta Etelä-Suomen ensiharvennusmännyn kuoretto- man puuaineen kuiva-tuoretiheys on rungon tyvellä tyypillisesti noin 440 kg/m³. Missä rungon kuorellinen läpimitta alittaa 7 cm, kuoretto- man puun kuiva-tuoretiheys on enää 370-375 kg/m³ eli 15 % alhaisempi kuin tyvellä. Ero tyvi- ja latvapölkkyjen välillä on siis merkittävä. Lajittelemalla tyvi- ja latvapölkkyt erilleen voidaan saada aikaan kaksi ominaisuuksiltaan erilaista kuitupuuluokkaa, jotka eroavat toisistaan niin prosessikäyttäytymisensä kuin tuotteen laadunkin suhteen.

Koska männyn kuori on puuainetta kevyempää, kuorellisen mäntypuun kuiva-tuoretiheys on aina alhaisempi kuin kuoretto- man. Ero on suurin rungon niissä osissa, joissa kuorta on suhteellisesti eniten, siis alimmassa tyvessä ja ylimmässä latvassa. Kuorellisen ensiharvennusmännyn kuiva-tuoretiheys on rungon tyvellä tyypillisesti 400-405 kg/m³ ja rungon latvassa 7 cm:n läpimitan tasolla 360-365 kg/m³.



Kuva 8. Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennuskönnöissä.



Kuva 9. Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheyden vaihtelu rungon pituussuunnassa 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennuskönnöissä.

2.3.2 Tiheyden vaihtelu runkojen välillä

Metsiemme kaikilla männyillä puuaineen tiheyden hajonta runkojen välillä on aikaisempien tutkimusten mukaan 8 % keskiarvosta (Hakkila 1966). Ensiharvennusmänniköistä poistettavien runkojen välinen kuiva-tuoretiheyden hajonta on vain 6 % keskiarvosta, sillä puut ovat tasaikäisiä ja -kokoisia, eivätkä ympäristötekijät ole vielä ennättäneet kovinkaan paljon vaikuttaa niitten puuaineen ominaisuuksiin.

	Rungoittainen keskiarvo, kg/m ³	Hajonta runkojen välillä, kg/m ³	Hajonta, % keskiarvosta
Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys	397,9	26,3	6,6
Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys	378,9	23,4	6,2

Harvennuksessa kasvamaan jätettävissä puissa kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys on 2,1 % ja kuorellisen puun 1,5 % alhaisempi kuin tyypillisissä alaharvennuspuissa. *Ajoura- ja laatuharvennuspuut siis lievästi alentavat kuitupuukertymän kuiva-tuoretiheyttä* nopeamman kasvun seurauksena. Sen sijaan *ensiharvennuksen myöhäistäminen johtaa kuiva-tuoretiheyden kasvuun*, sillä puuston varttuessa syntyy lusto lustolta tiheämpää puuta, ja toisaalta kuoriosuus puolestaan vähenee. Harventamattomuuteen liittyy myös kasvun hidastuminen, jonka myötä paksuseinäisten kesäpuusolujen suhteellinen osuus ja puun kuiva-tuoretiheys kasvavat.

Runkojen välistä *kuiva-tuoretiheyden vaihtelua selittää parhaiten puun paksuus-kasvunopeus*, jonka kiihtyminen johtaa kevyemmän puuaineen syntyyn. Rungoneri korkeuksilta mitattu, tilavuudella painotettu luston keskimääräinen paksuus selittää 34 % ja pelkästään rinnankorkeudelta mitattu luston paksuus 27 % runkojen välisestä vaihtelusta. Tiheys kasvaa iän myötä, mutta koska ensiharvennuspuusto on varsin tasaikäistä, iällä ei ole tässä tapauksessa paljonkaan selitysvoimaa. Kasvunopeuden ja iän vastakkaiset vaikutukset osittain vesittyvät puun kokoa kuvaavissa muuttujissa, joten runkojen välinen vaihtelu ei selity yksinään kokomuuttujien avulla.

Puun ominaisuus	Selitettävä muuttuja	
	Kuorettoman rungon kuiva-tuoretiheys	Kuorellisen rungon kuiva-tuoretiheys
	Korrelaatiokerroin (r)	
$D_{1,3}^2$	-0,286	-0,246
Pituus	+0,086	+0,162
Ikä	+0,412	+0,443
Luston paksuus rinnan- korkeudella = $(d_{1,3}/ikä)^2$	-0,517	-0,512
Luston paksuus koko rungossa keskimäärin	-0,586	-0,579

Mikäli rungon keskimääräiselle kuiva-tuoretiheydelle halutaan tapauskohtaisesti keskiarvolukua tarkempi arvio, sitä voidaan etsiä seuraavilla yhtälöillä, joissa selittäjinä ovat rinnankorkeusläpimitta, pituus, ikä ja latvussuhde. Hajonta regressiokäyriltä jää kuitenkin edelleen suureksi:

	R ²	Hajonta käyrältä, kg/m ³
Kuoreton puu:		
$y_4 = 442,1 - 164,5 (x_1/x_4)^2$	0,26	22,6
$y_4 = 497,1 - 0,193x_1^2 - 460,6/x_2 - 1906,8/x_4 + 0,6180x_3$	0,36	21,0
Kuorellinen puu:		
$y_5 = 399,6 - 144,8(x_1/x_4)^2$	0,27	20,0
$y_5 = 436,9 - 162,7(x_1/x_4)^2 - 493,7/x_2 + 0,00378x_3^2$	0,34	19,0

y_4 = kuorettoman rungon keskimääräinen kuiva-tuoretiheys, kg/m³

y_5 = kuorellisen rungon keskimääräinen kuiva-tuoretiheys, kg/m³

x_1 = $D_{1,3}$, cm

x_2 = pituus, m

x_3 = latvussuhde, %

x_4 = ikä, a

Kasvunopeudella on suuri vaikutus ensiharvennuskäynnin kuiva-tuoretiheyteen. Olkoon nopean kasvun kimmokkeena sitten viljava kasvupaikka, puun vallitseva asema metsikössä, harva kasvatusasento tai vaikkapa lannoitus, se alentaa tiheyttä yhtäläillä. Edellä esitettyihin runkokohtaisiin regressioyhtälöihin perustuva esimerkkilaskelma osoittaa, että iältään 30-vuotiaassa hyötykasvuissa, rinnankorkeusläpimitaltaan 16 cm:n rungossa puuainees on kuiva-tuoretiheydeltään 5 % kevyempää kuin samanikäisessä hitaammin kasvaneessa 12 cm:n rungossa.

$D_{1,3}$, cm 30 vuoden iässä	Kuoreton runko Rungon kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	Kuorellinen runko
8	410,4	389,3
12	395,8	376,4
16	375,4	358,1

On syytä korostaa, että tässä tarkastelussa selittäjänä on yksityisen rungon kasvunopeus eikä suinkaan puuston kasvu hehtaaria kohti laskettuna. Metsikön korkea tuotos ei välttämättä johda alhaiseen puuaineen tiheyteen, silloin kun kasvu jakaantuu suuren runkoluvun kesken.

2.3.3 Tiheyden vaihtelu leimikoitten välillä

Leimikkokohtaiset tulokset kuorettoman ja kuorellisen puuaineen tiheydestä ovat rungon tilavuudella painotettuja 15 puun keskiarvoja. Ne ovat 0,8 % alhaisempia kuin rungoittaisen aineiston aritmeettiset keskiarvot, sillä leimikon sisällä puuaineen tiheys on pienin suurimmissa puissa.

Hajonta leimikoitten välillä on pienempi kuin hajonta yksityisten runkojen välillä leimikon sisällä. Puitten tilajärjestyksestä ja perimästä aiheutuva vaihtelu osittain eliminoituu leimikoittaisista keskiarvoista. Alhainen 4 %:n leimikkohajonta kuvastaa ensiharvennumännyn tasaista laatua ja antaa mahdollisuuden ennustaa leimikoittainen puuaineen tiheys luotettavasti:

	Leimikoittainen keskiarvo, kg/m ³	Hajonta leimikoitten välillä, kg/m ³	Hajonta, % keskiarvosta
Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys	394,7	17,3	4,4
Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys	376,0	15,1	4,0

Leimikoitten välistä vaihtelua selittävät samat muuttujat kuin runkojen välistä, mutta korrelaatiot ovat kiinteämpiä. Leimikon puuston keskikokoa kuvaavat muuttujat eivät yksinään ole tehokkaita, vaan niiden rinnalla tarvitaan myös tieto puun iästä, jolloin vaihtelua selitetäänkin kasvunopeudella. Korkein korrelaatiokerroin on leimikon puuston keskimääräisellä, havaintokohdan poikkileikkauspinta-alalla painotetulla luston paksuudella, jossa rungon kaikki korkeudet ovat tasapuolisesti edustettuina. Se on selittäjänä voimakkaampi kuin pelkästään rinnankorkeudelta mitattu luston paksuus, mutta käytännön toiminnassa vain jälkimmäinen on käyttökelpoinen. Todettakoon, että kaikilta korkeuksilta mitattu luston paksuus oli koko aineistossa keskimäärin 2,69 mm, kun taas rinnankorkeudelta mitattu luston paksuus oli vain 1,84 mm.

Leimikkokohtainen puun ominaisuus	Selitettävä muuttuja	
	Leimikkokohtainen kuorettoman rungon kuiva-tuoretiheys	Leimikkokohtainen kuorellisen rungon kuiva-tuoretiheys
	Korrelaatiokerroin (r)	
$D_{1,3}^2$	-0,313	-0,204
Pituus ²	+0,179	+0,295
Ikä, a	+0,694	+0,719
Luston paksuus rinnankorkeudella = $D_{1,3}/ikä^2$	-0,773	-0,750
Luston paksuus koko rungossa keskimäärin	-0,825	-0,825

Eteläsuomalaisen ensiharvennumännikön puuaineen keskimääräinen tiheys voidaan arvioida pelkästään luston keskimääräisen paksuuden perusteella. Selityksaste on miltei kaksinkertainen rungoittaisiin yhtälöihin verrattuna, ja ennustearvon hajonta regressiokäyrältä on vain 11 kg/m³ eli alle 3 % keskiarvosta.

	R ²	Hajonta käyrältä, kg/m ³
Kuoreton puu, tiheyden leimikkokeskiarvo: $y_4 = 422,3 - 194,64(x_1/x_4)^2$	0,600	11,3
Kuorellinen puu, tiheyden leimikkokeskiarvo: $y_5 = 402,7 - 2225,39x_1/x_4^2$	0,562	10,3

y_4 = kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys leimikossa, kg/m³

y_5 = kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys leimikossa, kg/m³

x_1 = poistettavien puitten keskimääräinen $D_{1,3}$, cm

x_4 = poistettavien puitten keskimääräinen ikä, a

Yhtälöt osoittavat, että leimikoitten välillä on kuitu- ja energiapuun käyttöarvon kannalta merkittäviä eroja. Esimerkiksi voidaan ottaa kaksi männikköä, joissa kummassakin poistettavan puuston keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta on 12 cm, mutta toinen on iältään 25-vuotias ja toinen 40-vuotias. Nuoremmassa leimikossa puuaineen tiheys on lähes 7 % alhaisempi:

	Puuston $D_{1,3}$ 12 cm, ikä 25 a	Puuston $D_{1,3}$ 12 cm, ikä 40 a
	Leimikon kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	
Kuoreton puu	377,5	404,8
Kuorellinen puu	360,0	386,0

Esimerkki heijastaa eroja, joita käytännössä esiintyy karujen ja viljavien kasvupaikkojen ensiharvennumänniköitten välillä. Poistettava puusto on hakkuuhetkellä kaikilla kasvupaikoilla rinnankorkeusläpimitaltaan lähes yhtä järeätä, mutta tuoreilla kankailla ensiharvennus tehdään nopeamman kasvun ansiosta nuoremmalla iällä kuin kuivilla ja kuivahkoilla kankailla. Leimikkoaineistossa ero kasvupaikkatyyppien välillä oli seuraava:

	CT ja VT -kankaat	MT ja OMT -kankaat
Leimikoitten lukumäärä	11	5
Ikä, a	35	28
$D_{1,3}$, cm	11,5	12,1
Luston keskimääräinen paksuus, mm	2,5	3,1
Kuoreton kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	404,1	374,1
Kuorellinen kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	384,2	358,2

Parikan ja Vikingen (1994) tutkimuksessa paksuoksaisten istutusmännikön kuoretoman puuaineen kuiva-tuoretiheys oli Keski-Ruotsissa 30 vuoden iällä vain 362 kg/m^3 eli 13 % alhaisempi kuin alueen mäntykuitupuussa keskimäärin. Käsillä olevaan aineistoon sisältyy yksi OMT-kankaan 24-vuotias hyötykasvuinen istutusmännikkö, ja myös siinä puuaineen tiheys oli alhainen 367 kg/m^3 .

Koska ensiharvennusmänniköt ovat iältään nuoria, niistä korjattavan puutavaran kuiva-tuoretiheyden oletetaan jäävän alhaisemmaksi kuin mäntykuitupuussa keskimäärin. Ero ei ole kuitenkaan suuri, sillä ensiharvennusleimikoissa kuitupuuksi tehdään puun koko käyttöosa, joksi läpimittavaatimuksesta johtuen usein kelpuutetaan vain rungon alapuolisko. Varttuneemmissa kuitupuuta tuottavissa leimikoissa taas ainakin osa tyvipölkkyistä ohjautuu sahatukeiksi, jolloin kuidutukseen jää vain kevyempi latvapää. Ero mäntytukkien pintaosasta tehtävään sahanhakkeeseen sen sijaan on merkittävä (Hakkila 1968b):

	Puuaineen kuiva-tuoretiheys, kg/m^3
Ensiharvennusmänty	395
Mäntykuitupuun keskimäärin	407
Kuusikuitupuun keskimäärin	384
Mäntysahanhake	435
Kuusisahanhake	386

2.4 Puuaineen uuteainepitoisuus

Mäntypuun elävissä tylppysoluissa ja pihkatiehyitten epiteelisoluissa on uuteaineita, jotka saattavat tuottaa ongelmia massoja valmistettaessa ja käytettäessä. Ne estävät nesteitten tunkeutumista hakkeeseen ja hajottavat keittokemikaaleja, mikä hidastaa keittoa ja lisää kemikaalien kulutusta. Ne aiheuttavat valkaisu-, väri- ja pihkaongelmia rajoittaen mäntypuun käyttöä mekaanisen massan raaka-aineena. Ne myös alentavat puuaineen kuiva-tuoretiheyden pohjalta laskettua massan saantoa, mutta toisaalta niistä saadaan sellun sivutuotteina tärpähtiä ja mäntyöljyä.

Uuteaineet liukenevat veteen ja orgaanisiin liuottimiin. Tässä *tutkimuksessa tarkastellaan asetoniin liukenevia uuteaineita*, jotka sisältävät ensisijaisesti lipofiilisiä yhdisteitä kuten rasvoja (vapaita rasvahappoja ja triglyseridejä), hartsihappoja, terpeenejä sekä fenoleita ja muita hydrofiilisiä yhdisteitä.

Asetoniin liukenevien uuteaineitten osuus on koko tutkimusaineistossa keskimäärin 3,28 % puun kuivamassasta (taulukko 3). Vaihtelu on rungon pituus-suunnassa vähäistä mutta runkojen välillä sen sijaan merkittävää. Hajonta runkojen välillä on 15 % keskiarvosta.

Kasvunopeuden vaikutus on selvä. *Hidaskasvuisessa metsikössä puun asetoniuuteepitoisuus oli 3,0 % mutta OMT:n nopeakasvuisessa metsikössä 3,8 %*. Hyvän kasvun turvin puulla on mahdollisuus sijoittaa yhteyttämäänsä hiiltä myös vararavintoon, tässä tapauksessa rasvoihin.

Myöhemmin, ensiharvennusvaiheen jo jäätyä taakse, uuteaineiden määrä puun ytimessä kasvaa sydänpuun muodostumisen myötä, ja myös niiden koostumus muuttuu. Vanhemman rungon pintapuun ja *nuoren puun asetoniliukoissa uuteaineissa on rasvoja (triglyseridejä) 2-3 % mutta hartsihappoja yleensä vain noin 0,5 % puun kuivamassasta*. Sydänpuussa puolestaan on huomattavasti enemmän vapaita rasvahappoja, hartsihappoja ja fenoleita.

Etelä-Suomen mäntykuitupuussa on asetoniin liukenevia uuteaineita sydänpuussa 5,0 %, pintapuussa 3,0 % ja rungossa keskimäärin 3,4 % eli määrällisesti 13,4 kg kuoretonta kuutiometriä kohti (Hakkila 1968a). Tämän tutkimuksen mukaan ensiharvennusmännyn vastaavat arvot ovat 3,3 % ja 13,0 kg/m³. Määrällinen ero ensiharvennusmännyn ja muun mäntykuitupuun välillä ei ole merkitsevä. Sen sijaan koostumuksen osalta ero on huomattava, kun ensiharvennusmännnyssä ei vielä ole selkeätä sydänpuuta. Paperiteollisuudessa ensiharvennuspuu ei liene herkkä aiheuttamaan pihkaongelmia.

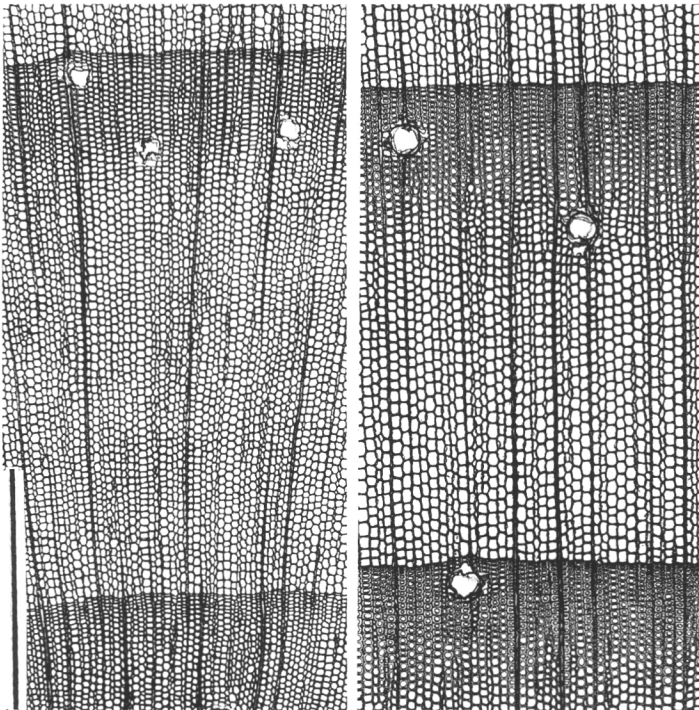
Taulukko 3. Asetoniliukoisten uuteaineitten osuus ensiharvennusmännyn kuivamassasta Etelä-Suomessa. Aineistona 50 puuta 5 eri leimikosta.

Etäisyys maan tasalta, m	Hidas- kasvuinen metsikkö (lusto 1,2 mm)	Nopea- kasvuinen metsikkö (lusto 2,4 mm)	Keski- määräinen metsikkö (lusto 1,7 mm)	Hajonta runkojen välillä
Uuteaineet, % puun kuivamassasta				
7,5	3,02	3,94	3,37	0,55
5,5	2,89	3,86	3,24	0,52
3,5	2,99	3,76	3,35	0,55
1,5	3,00	3,70	3,20	0,38
Koko runko	2,98	3,77	3,28	0,49

2.5 Kuidun pituus

Paperin ominaisuudet riippuvat kuidun dimensioista. Jos paperin kuituliitokset ovat heikkoja, repeämislujuus riippuu enemmän kuidun pituudesta kuin kuidun lujuudesta. Jos kuituliitokset ovat lujia, tärkeysjärjestys on päinvastainen (Seth & Page 1988).

Kuidun pituutta selkeämmin paperin laatua ja lujuutta kuvastaa *kuidun massan ja pituuden suhde eli pituusmassa*, jonka mittayksikkönä on mg/m (Paavilainen 1993). Jos *kuidut ovat ohutseinäisiä* eli jos puuaineen tiheys on alhainen, myös pituusmassa on alhainen. Kuten luvun 2.3 alussa todetaan, tällaisesta raaka-aineesta tehdylle paperille ovat ominaisia heikko repäisy-lujuus mutta vahva veto-, puhkaisu- ja taittolujuus. Sille ovat ominaisia myös pieni bulkki, läpikuultamattomuus ja sileä pinta, erityisesti jos joukossa on runsaasti lyhyitä kuituja. Nämä *tunnusmerkit ovat ominaisia nuorpuun kuiduille*, joitten osuus on ensiharvennumännynssä suhteellisesti suurempi kuin myöhemmistä harvennuksista saatavassa mäntykuitupuussa ja sahanhakkeessa. Kuva 10 osoittaa, miten kuidun läpimitta ja seinämän paksuus kasvavat mäntyrungon ytimestä pintaa kohti puun iän myötä. Kuvan esimerkissä solujen mitat ovat seuraavat:



Kuva 10. Esimerkki männyn vuosiluston rakenteesta rungon ydintä ympäröivässä nuorpuuvyöhykkeessä (3. vuosilusto, vasemmalla) ja varttuneessa pintapuussa (40. vuosilusto). Mittajanan pituus 1 mm (kuva Pekka Saranpää).

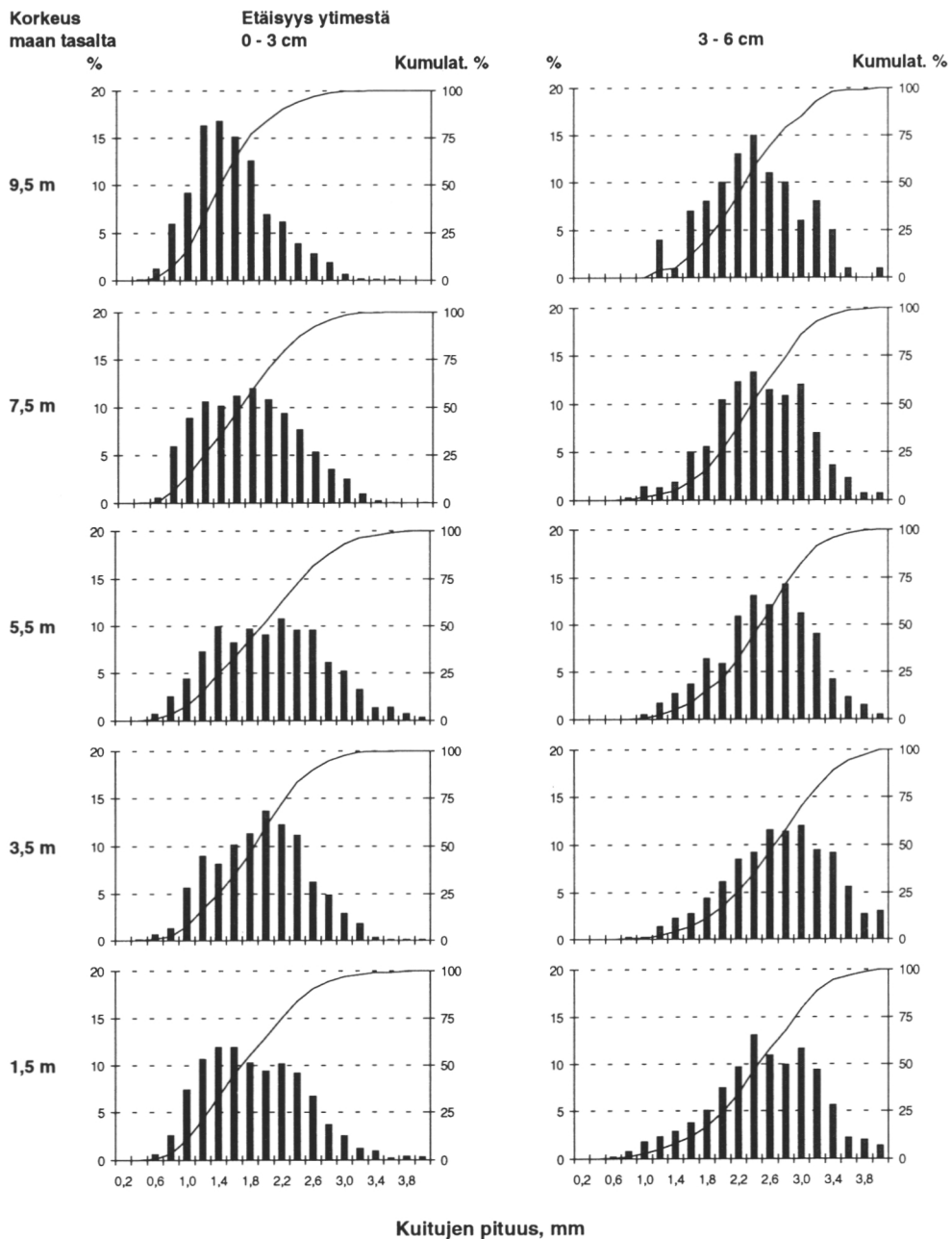
	3. vuosilusto	40. vuosilusto
	μm	
Soluontelon läpimitta:		
Kevätpuussa	21,9	36,8
Kesäpuussa	18,1	13,7
Solunseinämän 2-kertainen paksuus:		
Kevätpuussa	4,5	6,0
Kesäpuussa	6,5	10,4

Tässä tutkimuksessa kuitumittauksia tehtiin vain yhdessä hidaskasvuisessa puolukkatyyppin leimikossa. Mittaukset kohdistuivat puunäytteitä maseroimalla irrotettuihin ehjiin kuituihin. Ytimen ympärillä olevassa 6 cm:n läpimittaisessa nuorpuuvyöhykkeessä kuidun pituus oli keskimäärin 1,94 mm, sen ulkopuolisessa varttuneemmassa puuaineessa 2,70 mm ja koko rungossa keskimäärin 2,34 mm. Kuidun pituus oli 5 m:n tyvipölkkyssä keskimäärin 2,47 mm mutta sen yläpuolella oleellisesti lyhyempi (taulukko 4). Kuvan 11 kukin osite osoittaa sadan kuidun pituusluokittaisen ja kumulatiivisen jakauman.

Metsäntutkimuslaitoksen julkaisemattomassa aineistossa kuidun pituus on järeämmässä mäntypuussa 7 cm:n etäisyydellä ytimestä keskimäärin 3,1 mm ja 12 cm:n etäisyydellä ytimestä 3,5 mm. Männyn sahanhakkeessa, joka on peräisin pääasiassa tukkien pintaosista, kuidun pituus vaihtelee välillä 3,0-3,4 mm (Saranpää, julkaisematon). *Kuidut ovat siis ensiharvennsmännityssä selvästi lyhyempiä kuin muussa kuitupuussa*, mutta pääosa kuiduista täyttää kuitenkin useisiin käyttötarkoituksiin vaadittavan 2 mm:n vähimmäispituuden (Walker 1993).

Taulukko 4. Kuidun (trakeidin) pituus rungon eri osissa puolukkatyyppin ensiharvennsmännikössä. Aineistona 13 runkoa yhdestä leimikosta.

Etäisyys maan tasalta, m	Etäisyys rungon ytimestä		Keski- määrin	Hajonta runkojen välillä
	Alle 30 mm	Yli 30 mm		
Kuidun pituus, mm				
11,5	1,35		1,35	0,31
9,5	1,68	2,49	1,69	0,22
7,5	1,87	2,58	2,05	0,28
5,5	2,17	2,65	2,39	0,21
3,5	2,00	2,83	2,51	0,17
1,5	1,93	2,68	2,44	0,25
Koko runko	1,94	2,70	2,34	0,22



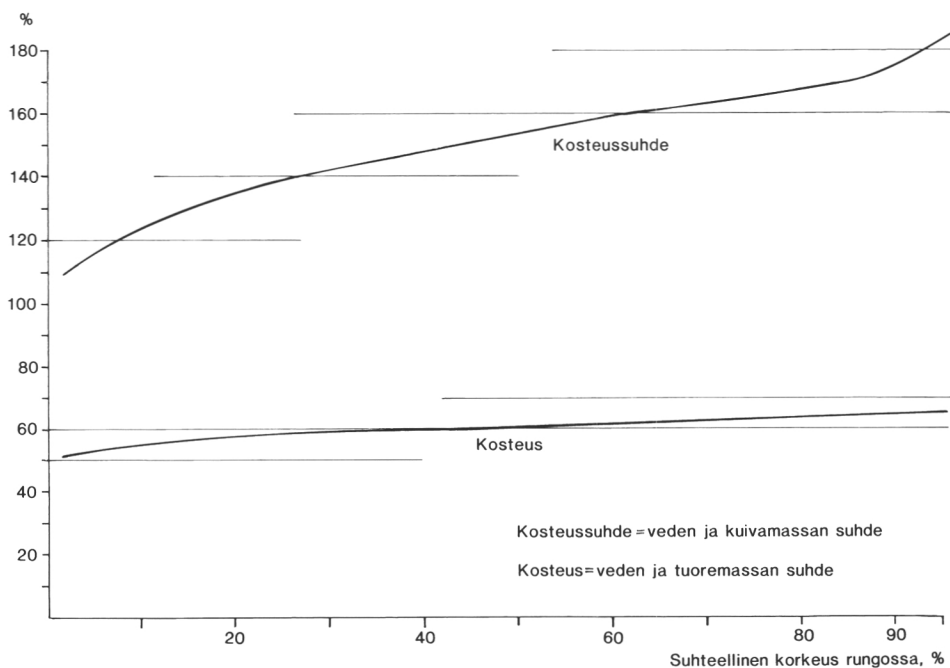
Kuva 11. Kuidun pituuden vaihtelu mäntyrungon eri korkeuksilla ytimen ympäristön nuorpuuvyöhykkeessä (läpimitta 6 cm) ja sen ulkopuolisessa varttuneessa puuainessa.

2.6 Kosteus

Puun kosteus vaikuttaa tuoretiheyteen, joka puolestaan vaikuttaa autokuorman kokoon ja kuljetuksen kustannuksiin. Kosteudesta riippuu puun käyttäytyminen kuorinnassa sekä mekaanisessa ja kemiallisessa kuidutuksessa. Kosteuden vaihtelu vaikeuttaa keittoerän kuivamassan ja sitä kautta oikean kemikaaliannostuksen arvioimista, mutta sen merkitys ei ole sulfaattikeitossa kuitenkaan samalla tavoin kriittinen kuin mekaanisessa kuidutuksessa. Kosteus on myös polttoaineen laatutekijä, joskin sen vaikutus on laite- ja laitoskohtainen.

Kosteus ilmoittaa veden prosenttiosuuden tuoremassasta. Rinnakkaiskäsite kosteussuhde osoittaa veden määrän suhteessa kuivamassaan. Jälkimmäinen on puutavaran kosteuserojen ja muutosten indikaattorina herkempi. Kahta leimikkoa lukuun ottamatta aineisto kerättiin touko-lokakuun välisenä aikana, jolloin männyn kosteus on ehkä hieman alhaisempi kuin talvikaudella.

Kuva 12 osoittaa kosteuden ja kosteussuhteen vaihtelun kaatotuoreen kuorellisen mäntyrungon pituussuunnassa. Kosteus on rungon tyvellä 51-52% mutta ylimmässä latvassa 60-65%. Kun vettä johtavan solukon pinta-ala pienenee latvaa kohti, seurauksena on kosteuden jyrkkä kohoaminen. Tämä on mahdollista, koska solun seinämät käyvät samalla ohuemmiksi ja soluontelot suhteellisesti tilavammiksi. Kuoressa taas nilan suhteellinen osuus kasvaa ja kuivan ulkokuoren supistuu latvaa kohti.



Kuva 12. Kuorellisen rungon kosteuden ja kosteussuhteen vaihtelu rungon pituussuunnassa Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköissä.

Koko aineistossa kuorellisen rungon kosteus on keskimäärin 58,3 %. Runkotunnusten pohjalta voidaan rakentaa seuraava regressioyhtälö, jonka selitysvoi-
ma on kuitenkin vähäinen. Vaihtelu aiheutuu osaksi sääsuhteista ja vuodena-
jasta eikä ole siltä osin tässä yhteydessä selitettävissä.

$$y_6 = 102,4 + 0,0555x_1^2 + 950,9/x_4$$

R^2	Hajonta käyrältä, %
0,26	14,9

y_6 = kuorellisen rungon kosteussuhde, %

x_1 = $D_{1,3}$, cm

x_4 = ikä, a

Vaikkei ensiharvennuspuustossa varsinaista sydänpuuta ole vielä nähtävissä, iän vaikutus kosteuteen on kuitenkin jo havaittavissa. Toisaalta nopeakasvuinen puu on hidaskasvuista ja tiivistä puuta kostempaa. Siitä syystä kosteus on ajour-
puissa hieman korkeampi kuin alaharvennuspuissa. Harvennuksen voimakkuu-
den lisääminen merkitsee siis kosteuden hienoista kasvua, ja harvennuksen
viivästyminen taas kosteuden alenemista. Yhtälöstä johdettu asetelma osoittaa,
etteivät erot kuitenkaan ole painomittausta lukuun ottamatta merkityksellisiä:

$D_{1,3}$, cm	Puun ikä, a	
	25	40
Kuorellisen rungon kosteus, %		
10	59,3	56,9
15	60,5	58,1

Leimikkotasolla kosteus voidaan ennustaa luotettavammin kuin runkokohtaises-
ti. Siihen vaikuttavat selvimmin metsikön ikä ja kasvunopeus. Niinpä tuoreilta
kankailta korjatun kuorellisen ensiharvennusmännyn kosteus oli tutkimusaineis-
tossa 59,7% mutta kuivilta ja kuivahkoilta kankailta korjatun hitaammin kasva-
neen puun vastaavasti vain 58,0%. Vielä kiinteämpi korrelaatio vallitsee kosteu-
den ja puun kuiva-tuoretiheyden välillä:

Leimikon ominaisuus	Korrelaatiokerroin (r) kuorellisen puun leimikkokohtaisen kosteussuhteen kanssa
Ikä, a	-0,556
$D_{1,3}^2$	+0,061
$D_{1,3}/\text{ikä}^2$	+0,509
Kuiva-tuoretiheys kuoretta	-0,789
Kuiva-tuoretiheys kuorineen	-0,821

Leimikkokohtainen kosteussuhde voidaan arvioida metsikön iän pohjalta seuraavalla regressioyhtälöllä. Nuoren kasvatusmännikön varttuessa sen keskimääräinen kosteussuhde alenee lähes 0,7 prosenttiyksikköä vuodessa. Veden määrä kuorellisen runkopuun kuutiometriä kohti alenee vastaavasti 2,6 kg vuodessa.

	R ²	Hajonta käyrältä, %
$y_6 = 162,9 - 0,656x_4$	0,31	7,2

y_6 = kuorellisen runkopuun leimikkokohtainen kosteussuhde, %

x_4 = metsikön ikä, a

Myös latvusmassan kosteus kohoaa latvusrajalta latvuksen kärkeä kohti. Tämä selittyy kuolleitten oksien osuuden vähenemisellä, neulasten osuuden kasvulla sekä oksien läpimitan pienenemisellä, mikä merkitsee alhaisempaa puuaineen tiheyttä, suurempia soluonteloita ja suurempaa kuoriosuutta. Neulasten kosteus vaihtelee kasvukauden aikana säätilasta ja haihdunnasta riippuen päivittäin ja jopa vuorokaudenajan mukaan, heijastuen edelleen oksien ja rungon puuaineen ja nilan kosteusmuutoksina.

Etelä-Suomen männiköistä kerättyssä laajassa aineistossa elävän latvusmassan kosteus oli 55,4 %. Kuolleitten oksien kosteus vaihteli ilman suhteellisesta kosteudesta ja sateista riippuen ollen kesällä keskimäärin vain 22 %. Kuolleet oksat, joita ensiharvennumännityssä on poikkeuksellisen paljon, alensivat koko latvusmassan keskimääräisen kosteuden 52,4 %:iin (Hakkila 1991). Oksissa kuoren kosteus on jonkin verran korkeampi kuin puuaineen. Kärkkäisen (1976 b) tutkimuksessa männyn oksien kuoren kosteus oli 55,4 % ja puuaineen 52,8 %.

Kaatotuoreen ensiharvennumännyn biomassan keskimääräinen kosteus on lumentoman kauden aikana edellä kuvattujen tulosten mukaan seuraava. Talvikaudet eivät ole keskiarvoissa mukana:

	Kosteus, %
Kuorellinen runko	58,3
Elävä latvusmassa	55,4
Kaikki latvusmassa	52,4
Runko + elävä latvusmassa	57,8
Runko + kaikki latvusmassa	57,1

2.7 Lämpöarvo

Kalorimetrinen lämpöarvo osoittaa polttoaineesta vapautuvan lämpöenergian määrän. Osa näin mitatusta lämpöenergiasta kuluu kuitenkin polttoaineessa olevan ja siitä palamisreaktiossa syntyvän veden höyrystämiseen.

Tehollinen lämpöarvo ottaa höyrystämiseen kuluvan energian vähennyksenä huomioon mutta kuitenkin siten, että poistuvan vesihöyryn lämpötila oletetaan samaksi kuin polttoaineen alkuperäinen lämpötila. Uuden lämpölaitosteknologian ansiosta eräissä laitoksissa on ainakin teoreettisesti mahdollista päästä poltossa jopa yli 100 %:n hyötysuhteeseen biomassan tehollisesta lämpöarvosta laskettuna, kun savukaasujen mukana poistuva vesihöyry tiivistetään ja höyrystämiseen huvennut lämpöenergia saadaankin talteen. Lämpöarvon yksikkönä on MJ/kg tai kWh/kg polttoainetta. Yksiköitten välinen muuntoluku on MJ=0,2778 kWh.

Taulukko 5 osoittaa ensiharvennusmännikön biomassakomponenttien tehollisen lämpöarvon puun kosteudesta riippuen. Kaatohetken korkea 55-60 %:n kosteus yleensä alenee korjuun ja varastoinnin aikana jonkin verran, varsinkin jos rungon kuori rikkoutuu puita koneellisesti käsiteltäessä. Muutokset ovat kuitenkin verkkaaisia. Rasiinkaadettunakin pienikokoinen mänty kuivuu hitaasti (Hakkila 1962).

Taulukko 5. Etelä-Suomen ensiharvennusmännyn tehollinen lämpöarvo. Kuivamassan lämpöarvot Nurmen (1993), elävien oksien puuaineen ja kuoren kuiva-tuoretiheydet Kärkkäisen (1976b), neulasten kuiva-tuoretiheys Gislerudin (1974) sekä runkopuun ja rungon kuoren kuiva-tuoretiheydet ja biomassakomponenttien paljousuhteet tämän tutkimuksen mukaan.

Biomassa-komponentti	Massa-osuus, %	Kuiva-tuoretiheys kg/m ³	Kosteus tuoremassasta, %				
			0	0	40	50	60
			Tehollinen lämpöarvo				
			MJ/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg
Runko:							
Puu	89,5	395	19,31	5,36	4,91	4,68	4,34
Kuori	10,5	266	19,53	5,43	4,98	4,75	4,41
Puu+kuori	100,0	376	19,33	5,37	4,92	4,69	4,35
Elävät oksat:							
Puu	9,2	424	19,97	5,55	5,10	4,87	4,53
Kuori	5,4	311	20,67	5,74	5,29	5,06	4,72
Puu+kuori	14,6	382	20,23	5,62	5,17	4,94	4,60
Neulaset	7,5	373	21,00	5,83	5,38	5,15	4,71
Elävä latvus	22,1	379	20,49	5,69	5,24	5,01	4,67
Kuolleet oksat	5,9	424	19,97	5,55	5,10	4,87	4,53
Koko latvus	28,0	388	20,38	5,66	5,21	4,98	4,64
Koko puu	128,0	379	19,56	5,43	4,98	4,75	4,41

Taulukko 6. Ensiharvennuskäynnin biomassakomponenttien tehollinen lämpöarvo ja tuhkapitoisuus kuutiometriä kohti laskettuna.

Biomassa-komponentti	Kosteus 40 % Tehollinen lämpöarvo, MWh/m ³	Kosteus 50 % Tehollinen lämpöarvo, MWh/m ³	Tuhka, % kuivamassasta	Tuhka, kg/m ³ biomassaa
Runko:				
Kuoreton puu	1,95	1,86	0,40	1,6
Kuori	1,32	1,26	2,55	6,8
Kuorellinen puu	1,86	1,78	0,62	2,3
Oksat:				
Kuorellinen puu	1,97	1,89	1,03	3,9
Neulas	2,01	1,92	2,35	8,8
Elävä latvus	1,99	1,90	1,48	5,6
Koko latvus	2,02	1,93	1,25	4,9
Koko puu	1,89	1,81	0,76	2,9

Ensiharvennuskäynnin biomassakomponenttien tehollinen lämpöarvo on 40 %:n kosteudessa noin 1,9-2 MWh kiintokuutiometriä kohti. Poikkeuksena on kuori, jonka tehollinen lämpöarvo on alhaisen kuiva-tuoretiheyden vuoksi vain 1,3 MWh/m³ (taulukko 6).

Puuta poltettaessa pääosa epäorgaanisista aineista jää jäljelle palamattomana tuhkana. Biomassan tuhkapitoisuus vaihtelee puulajista, kasvupaikasta ja puun koosta riippuen. Se on pienin kuorettomassa runkopuussa, männyllä noin 0,4 % kuivamassasta. Kuoren tuhkapitoisuus on runkopuuhun verrattuna eri puulajeilla 5-8-kertainen. Myös neulasissa on runsaasti tuhkaa, männyn neulasissa kuitenkin vähemmän kuin kuusen.

Ensiharvennuskäynnin eri biomassakomponenteista jää poltettaessa puhdasta tuhkaa 1,5-9 kg/m³ (Hakkila & Kalaja 1983). Polttopuun epäpuhtauksista peräisin oleva hiekka ja muu ylimääräinen aines eivät ole näissä luvuissa mukana.

2.8 Yhteenvedo runkopuun ominaisuuksista

Taulukossa 7 on yhteenvedo Etelä-Suomen ensiharvennuskäynnin runkopuun teknisistä ominaisuuksista keskimäärin koko rungossa, 6 cm:n läpimitan täyttävässä rungonosassa sekä 8 cm:n läpimitan täyttävässä rungonosassa. Lisäksi nähdään samat ominaisuudet 6-8 cm:n läpimitteisessä, 4-6 cm:n läpimitteisessä sekä 1-4 cm:n läpimitteisessä latvapuussa.

Kun vähimmäislatvaläpimittaa alennetaan, saadaan lisäraaka-aineena kuitupuuta, jossa on keskiarvoon verrattuna leveämmät lustot, ohuempi kuori, suurempi kuoripitoisuus, alhaisempi kuiva-tuoretiheys, korkeampi kosteus ja lyhyempi kuitu. Energiakäytössä tälle latvapuulle on ominaista alhaisempi lämpöarvo kuutiometriä kohti laskettuna ja runsaampi tuhkapitoisuus.

Yleisen käsityksen mukaan ensiharvennusmännyn puutekniset ominaisuudet eivät ole normaalin mäntykuitupuun veroiset, ja näitten ominaisuuksien tiedetään muuttuvan rungon latvaa kohti edelleen huonompaan suuntaan. Erot eivät kuitenkaan ole niin suuria, etteikö ensiharvennusmännyn latvaosakin aina 5 cm:iin saakka olisi kuidutukseen kelvollista. Ominaisuuksien merkitys riippuu luonnollisesti siitä, minkälaiseen paperiin ja minkälaisessa seossuhteessa näitä kuituja lopulta käytetään. Tärkeätä on, että ominaisuudet tunnetaan, että ominaisuuksiltaan poikkeavaa puuta käsitellään sille soveltuvalla tekniikalla ja että käyttökohde valitaan tai kuituvirran laatu tasoitetaan raaka-aineen ominaisuuksien mukaisesti.

Taulukko 7. Eteläsuomalaisen ensiharvennusmännyn runkokuuun keskimääräiset kuitu- ja energiapuuominaisuudet pystytuustossa.

Ominaisuus	Koko	Runko	Runko	Latvan hukkapuu, cm		
	runko	yli 6 cm	yli 8 cm	6-8	4-6	1-4
Kuoren määrä:						
- Paksuus, mm	4,5	4,6	5,0	2,4	2,3	1,8
- Tilavuusosuus, %	15,4	15,2	15,6	13,5	17,4	25,5
- Kuivamassaosuus, %	10,1	9,8	9,8	10,5	13,9	21,4
Kuiva-tuoretiheys, kg/m ³ :						
- Kuoreton puu	395	397	399	377	371	365
- Kuorellinen puu	376	377	379	361	352	340
- Kuori	267	266	265	275	274	278
Kuorellisen puun vesi:						
- Kosteus, %	59	58	58	61	62	63
- Kosteussuhde, %	141	140	138	158	164	170
Koostumus, kg/m ³ :						
- Uutteeton puuainees	327	329	331	312	293	258
- Puuainees asetoniute	11	11	11	11	10	9
- Kuori	38	37	37	38	49	73
- Vesi	530	528	523	570	577	578
- Yhteensä = tuoretiheys	906	905	902	931	929	918
MWh/m ³ , tuoreena:						
- Kuorellinen puu	1,64	1,64	1,65	1,57	1,53	1,48
- Kuoreton puu	1,71	1,72	1,73	1,64	1,61	1,58
- Kuori	1,18	1,17	1,17	1,21	1,21	1,23
MWh/m ³ , kosteus 40 %:						
- Kuorellinen puu	1,85	1,85	1,86	1,78	1,73	1,67
- Kuoreton puu	1,94	1,95	1,96	1,85	1,82	1,79
- Kuori	1,33	1,32	1,32	1,37	1,36	1,38
Luston paksuus, mm	2,7	2,6	2,6	3,0	3,2	3,1
Kuidun pituus, mm	2,3	2,4	2,4	2,4	2,0	1,7
Asetoniuteepitoisuus, %	3,3	3,3	3,3	3,3		
Kuorell. puun tuhka, kg/m ³	2,3	2,3	2,3	2,3	2,5	2,9

3 Ensiharvennusrönnön biomassa-koostumus

3.1 Latvusmassan koostumus

Latvusmassa muodostaa keskeisen osan ensiharvennusrönnököitten energiapotentiaalista. Sille ei ole vaihtoehtoista käyttöä teollisuuden raaka-aineena.

Koko latvusmassa koostuu puun kaikista elävistä ja kuolleista oksista neulasineen. *Puun elävä latvusmassa* sisältää vain elävät oksat neulasineen. Hakkuualalle jäävät latvusmassa ja hukkarunkopuu yhdessä muodostavat *hakkuutähteen*, johon tässä ei sisällytetä juurakoita eikä ylikorkeita kantoja.

Latvusmassan määrä tulee tuntea kokopuunen menetelmien kertymä-, arvosuhde- ja kuljetuskustannuslaskelmia sekä mittauksen muuntolukuja varten. Latvusmassatietoja tarvitaan myös ympäristöhoidon suunnittelussa, esimerkiksi metsäluonnon monimuotoisuuden edellyttämän kuolleen puubiomassan määrän tai kokopuunakorjuun aiheuttamien ravinnetappioiden ja poltossa syntyvän tuhkan määrän ja koostumuksen arvioimiseksi.

Latvusmassan määrä, koostumus ja suhteellinen osuus puun koko biomassasta vaihtelevat puulajista, puuston koosta, metsikön sulkeutuneisuudesta ja kehityshistoriasta, puun terveydentilasta ja elinvoimaisuudesta, kasvupaikan viljavuudesta, maantieteellisestä sijainnista sekä puuston perimästä riippuen. Etelä-Suomen ensiharvennusrönnököissä, joissa puuston koko on tasainen ja hoitokäytäntö verraten yhteneväinen, vaihtelu on luonnollisesti vähäisempää kuin kaikkien mäntyleimikoitten välillä keskimäärin. Siitä huolimatta myös ensiharvennusleimikoissa esiintyy vaihtelua taimikon harvennuksen voimakkuudesta ja ajankohdasta, ensiharvennuksen ajoittamisesta sekä kasvupaikasta riippuen.

Puukohtainen *latvusmassa voidaan arvioida runkotunnuksiin perustuvilla regressioyhtälöillä*. Ruotsissa tällaisia biomassafunktioita on laatinut Marklund (1988). Niitä apunaan käyttäen Parikka & Vikinge (1994) ovat kehittäneet Biosims-ohjelman, jolla harvennusleimikosta kertyvän kuitupuun tilavuus ja latvusmassa arvioidaan runkolukusarjan perusteella.

Metsäntutkimuslaitoksen aikaisemmin keräämissä aineistoissa selitysvoimaltaan vahvin runkotunnus on puun koko, lähinnä rinnankorkeusläpimitta. Selitysvoima kasvaa, jos kokomuuttujan ohella käytetään myös latvusmuuttujaa, joista käyttökelpoisin on latvussuhde. Useampien muuttujien lisääminen yhtälöön ei juurikaan kasvata selityssastetta. Seuraava yhtälö edustaa ensiharvennusrönnököitä koko maassa. Ohjelmaa on käytetty Ruotsin valtakunnan metsien inventointitietoihin liittyen myös valtakunnallisten ja alueellisten energiapuureservien arvioimiseen.

	R_2	Hajonta käyrältä, kg
$y_7 = -1,02 + 0,001154x_1^2x_3$	0,83	1,67

y_7 = koko latvusmassa kuivana, kg/puu

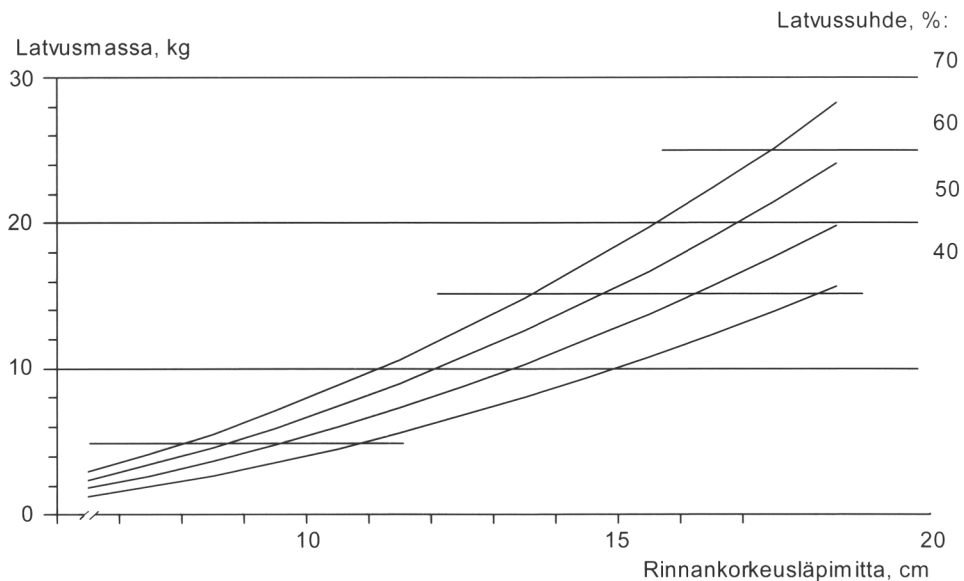
x_1 = puun $D_{1,3}$, cm

x_3 = puun latvussuhde, %

Yhtälön ja siihen perustuvan kuvan 13 avulla voidaan arvioida ensiharvennusmännyn latvusmassan määrä, kun latvussuhde tunnetaan. Poistettavan puuston latvussuhde on yleensä 40-60 %, jolloin alaraja edustaa viivästyneitä ensiharvennuksia ja ylitieheänä kasvaneita puustoja, yläraja taas varhaisia ensiharvennuksia ja harvassa kasvaneita puustoja. Pohjoisessa ensiharvennusmänniköitten latvussuhde on hieman suurempi kuin etelässä. Ellei latvussuhdetta tunneta, kaavassa käytetään latvussuhteen keskiarvolukua 50 %.

Taulukko 8 osoittaa latvusmassan koostumuksen ja määrän rungon kuorelliseen massa suhteutettuna, kun poistettavan puuston pituus on 11 m. Koko latvuksen kuivamassa on keskimäärin 106 kg kuorellisen runkopuun kuutiometriä kohti eli 28,0 % rungon kuorelliseen kuivamassa verrattuna. Pelkän elävän latvuksen massa on vastaavasti 84 kg/m³ ja 22,1 % rungon kuivamassa verrattuna.

Mitä varhaisemmin ensiharvennus toteutetaan, sitä suurempi on oksamassan suhteellinen määrä runkopuuhun verrattuna. Puuston varttuessa ja tihentyessä latvusto supistuu ja oksamassan osuus puun koko biomassasta hupenee. Männi-



Kuva 13. Ensiharvennusmännyn latvusmassa puun rinnankorkeusläpimitasta ja latvussuhteesta riippuen. Koko latvuksen kuivamassa (Hakkila 1991).

Taulukko 8. Latvuksen kuivamassa kuorellisen rungon tilavuuteen ja kuivamassaan suhteutettuna Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköissä.

Latvusmassan komponentti	Elävä latvus		Koko latvus		Latvusmassa/ runkomassa %
	Massa kg/m ³ runkopuuta	Jakauma %	Massa kg/m ³ runkopuuta	Jakauma %	
Neulaset	28,4	33,9	28,4	26,8	7,5
Elävien oksien kuori	20,6	24,5	20,6	19,4	5,4
Elävien oksien puu	34,9	41,6	34,9	32,9	9,2
Kuolleet oksat	-	-	22,2	20,9	5,9
Yhteensä	83,9	100,0	106,1	100,0	28,0

kön toisessa harvennuksessa koko latvusmassan määrä on keskimäärin enää 21,9 % ja elävän latvusmassan määrä 16,6 % kuorellisen rungon kuivamassaan verrattuna (Hakkila 1991).

Ensiharvennusmännyn latvusmassa koostuu seuraavista biomassakomponenteista: elävien oksien puuaines, elävien oksien kuoriaines, neulaset sekä kuolleet oksat. Oksien pienestä läpimitasta johtuu, että kuoren osuus on suuri. Vain kuolleissa oksissa kuorta on jäljellä niukalti. Neulasia on runsaasti, suhteellisesti sitä enemmän mitä nuoremasta ja pienemmästä puustosta on kysymys.

Ensiharvennusmännikössä *kuolleitten oksien* osuus, 21 % kaikesta latvusmassasta, on suhteellisesti suurempi kuin missään muussa männyn leimikkotyypissä tai millään muulla suomalaisella puulajilla. Puuston sulkeutuminen on niin äskettäinen tapahtuma, että kuolleita oksia on vielä paljon jäljellä, joskus lähes maan tasalle saakka.

Kuolleitten oksien merkitys on energiapuun kertymän ja korjuun työvaikeuden kannalta massaosuuttaan vähäisempi. Hakkuussa niitä katkeilee jo naapuripuita kaadettaessa. Erityisesti koneellisessa hakkuussa ja kaatovaiheen joukkokäsittelyssä hävikki on suuri, vaikka puut jätettäisiinkin karsimatta. Kuolleita oksia putoilee pois jokaisessa käsittelyvaiheessa, esimerkiksi metsätraktoria kuormattaessa ja purettaessa sekä hakkuria tai ketjukarsija-kuorijaa syötettäessä. Irtoileva aines menetetään terminaalityöskentelyä ehkä lukuun ottamatta, minkä vuoksi *kertymälaskelmien lähtökohdaksi asetetaan ensisijaisesti elävä latvusmassa*.

Korjuukoneita ja -menetelmiä kehitettäessä on tärkeätä tuntea *latvusmassan pystysuuntainen jakauma* rungon eri korkeuksilla. Tätä tietoa tarvitaan esimerkiksi arvioitaessa erilaisia apteerausvaihtoehtoja energiapuun kertymän ja metsämaan ravinnetappioitten kannalta. Taulukko 9 osoittaa elävän latvusmassan ja pelkän neulasmassan jakauman ensiharvennusmänniköstä poistettavassa puustossa.

Taulukko 9. Elävän latvusmassan ja pelkän neulasmassan pystysuuntainen jakauma Etelä-Suomen ensiharvennuskäynnissä. Poikkiviivan yläpuolelle jäävä osuus osoittaa suuntaa-antavasti metsään jäävän osuuden latvusmassasta, kun talteen otettavan runkopuun vähimmäisläpimitta on 5 cm.

Korkeus maasta, m	Puun pituus, m				
	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
Elävän latvusmassan jakauma, %					
14-16					4
12-14				5	25
10-12			7	33	34
8-10		7	37	38	25
6- 8	16	43	40	20	10
4- 6	57	42	15	4	3
2- 4	26	8	2	0	0
0- 2	1	0	-	-	-
Yhteensä	100	100	100	100	100
Pelkän neulasmassan jakauma, %					
14-16					6
12-14				7	33
10-12			8	34	36
8-10		8	41	36	17
6- 8	31	51	42	19	7
4- 6	61	38	9	4	1
2- 4	8	3	0	0	0
0- 2	0	0	-	-	-
Yhteensä	100	100	100	100	100

Jos talteenotettavan runkopuun vähimmäisläpimitta kuoren päällä on 5 cm, hukkakappaleen pituus on 10-12 m:n ensiharvennuskäynnissä 2,5-3,5 m, pienimmissä puissa selvästi enemmänkin. Jos vähimmäisläpimitta on 7 cm, tähteeksi jää 3,5-5 m:n pituinen osa rungosta. Latvaosan mukana metsään jää vastaava osa latvusmassasta ja neulasista kasvupaikan ravinnetasapainoa ylläpitämään:

	Pölkyn vähimmäisläpimitta	
	5 cm	7 cm
Hukkalatvaan jäävä osuus:		
Elävästä latvusmassasta, %	41,7	68,1
Neulasmassasta, %	48,0	73,5

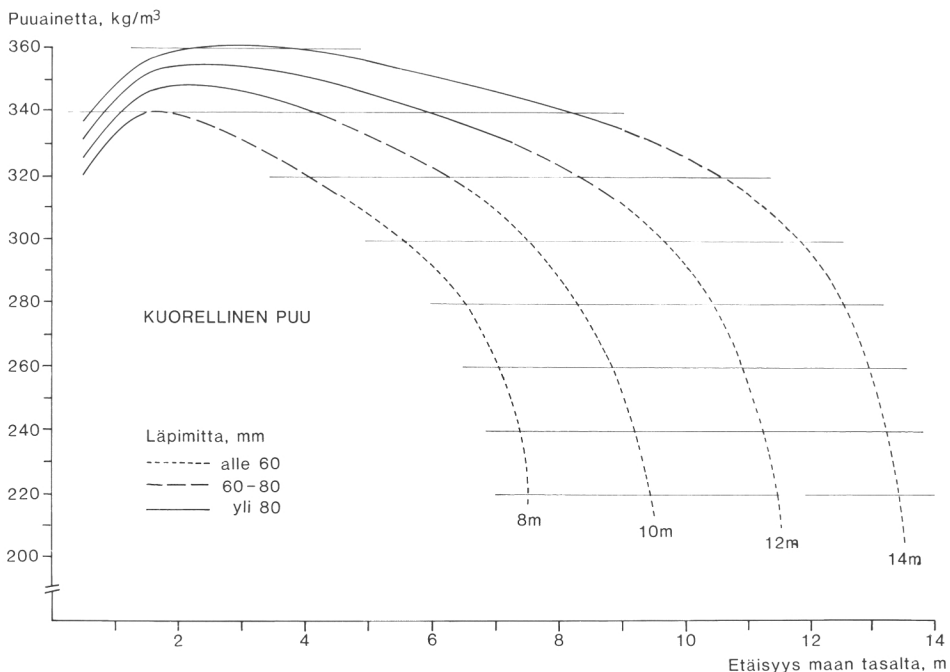
Latvakappaleen latvusmassalla on siis tärkeä merkitys energiapuun kertymän ja koostumuksen sekä toisaalta metsämaan ravinnetappioitten kannalta. Jos karsimattoman kuitu- ja energiapuun korjuussa asetetaan ohjearvoksi 5 cm:n vähim-

mäisläpimitta, latvakappaleen mukana jää metsään 42 % elävästä latvusmassasta ja 48 % pelkästä neulasmassasta. Lisäksi rungon alemmista osista katkeilee eläviä oksia ja pääosa kuolleista oksista silloinkin, kun puutavara otetaan talteen karsimattomana osapuuna. Poikela (1995) on taulukon 9 aineiston pohjalta kuvannut latvusmassan jakaumaa rungon pituussuunnassa weibull- ja betafunktioilla, joita voidaan hyödyntää erilaisissa laskentaohjelmissa.

Vain palstalla tapahtuva kokopuuhaketus antaa haluttaessa mahdollisuuden latvusmassan lähes täysimääräiseen talteenottoon. Sekä biomassakertymä että metsämaan ravinnetappiot ovat silloin suurimmillaan, ja tuotteena on pikemminkin polttohake kuin kuituteollisuuden raaka-aine.

3.2 Runkomassan koostumus

Kuitu- ja energiapuun välisen rajanvedon ja arvosuhdelaskennan kannalta on tarpeen tuntea, miten paljon puuainetta ja kuorta kuutiometri kuorellista runkopuuta sisältää. Raaka-ainesisältö voidaan laskea lukujen 2.2 ja 2.3 tiedoilla rungon kuoren tilavuusosuudesta sekä puuaineen ja kuoren kuiva-tuoretiheydestä.



Kuva 14. Kuorettoman puuaineen määrä kuorellisen runkopuun kuutiometriä kohti rungon eri korkeuksilla 8, 10, 12 ja 14 m:n pituisissa puissa Etelä-Suomen ensiharvennuskannikoissa.

Taulukko 10. Kuorellisen runkopuun raaka-ainekoostumus Etelä-Suomen ensiharvennumänniköitten pystypuustossa rungon eri osissa.

Komponentti	Rungonosan läpimitta, cm			
	1-4	4-6	6-8	8+
	Massa, kg/kuorellinen m ³			
Puuaines	270	306	326	345
Kuori	72	48	37	36
Kuivamassa	342	354	363	381
Vesi	577	576	571	521
Tuoremassa	919	930	934	902

Kuorellisen ensiharvennumännyn puuainesisältö on enimmillään 2-4 m:n etäisyydellä maan tasalta, keskimäärin 355 kg/m³, kun kuori ei ole enää paksua mutta kun puuaineen tiheys on vielä verraten korkea. Puuainesisältö alenee sitten latvaa kohti, aluksi hitaasti ja lopulta jyrkästi. Rungon kaventuessa 2 cm:n paksuuteen kuutiometri kuorellista puuta sisältää enää 230 kg puuainetta, sillä ylimmässä latvassa kaikki puuaines koostuu kevyestä nuorpuusta ja kuoriosuus on korkea (kuva 14).

Taulukko 10 osoittaa rungon kuiva- ja tuoremassan koostumuksen rungon läpimittavyöhykkeittäin. Puuaineen määrä kuorellisessa kuutiometrissä vähenee, mutta kuoren ja veden määrät kasvavat puun latvaa kohti. Puuaineen osuus tuoremassasta, on kuitupuun mitat täyttävässä rungonosassa 38 % mutta alle 5 cm:n latvassa enää 30 %.

3.3 Mittavaatimusten vaikutus kertymään

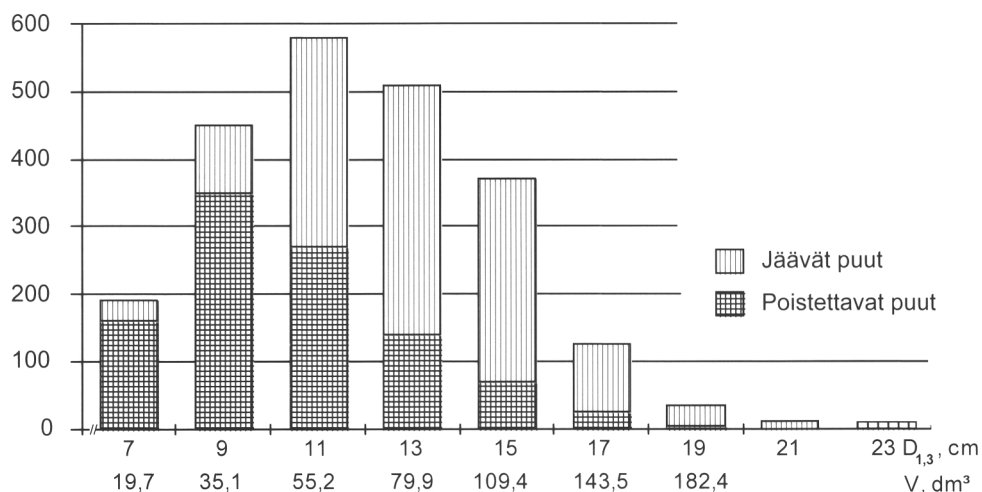
3.3.1 Laskelmien esimerkkileimikko

Etelä-Suomen ensiharvennumännikön puustorakennetta luonnehditaan esimerkinomaisesti kuvissa 15 ja 16, jotka perustuvat Metsätehon luovuttamiin tyyppileimikkotietoihin. Sekapuuosuus on jätetty huomioon ottamatta. Metsään tähteeksi jäävää *hukkarunkopuuta koskevat laskelmat luvussa 3.3.2 perustuvat tämän esimerkkileimikon runkolukusarjoihin*. Tulokset esitetään myös puun kokoluokittain, jolloin tiedon tarvitsijalle jää mahdollisuus rakentaa keskiarvolukuja tapauskohtaisesti muunkinlaisille leimikkorakenteille.

Esimerkkileimikosta poistetaan hehtaaria kohti 1000 runkoa, joitten kuorellinen keskitilavuus on 0,05 m³. Rinnankorkeusläpimitta sattuu puitten lukumäärän perusteella yleisimmin 7-13 cm:n ja kertymän tilavuuden perusteella 9-15 cm:n luokkiin. Pienimpiä puita poistetaan tasaisesti leimikon kaikista osista, kun taas rinnankorkeudella 15 cm:n läpimitan täyttävät puut ovat peräisinetupäässä koneille avatuilta urilta. Esimerkissä noudatetaan *Tapion harvennumalleja*, joitten mukaan ensimmäinen kaupallinen harvennus tapahtuu puuston pitempänä ollessa noin 11 m (Tapion vuosikirja 1993).

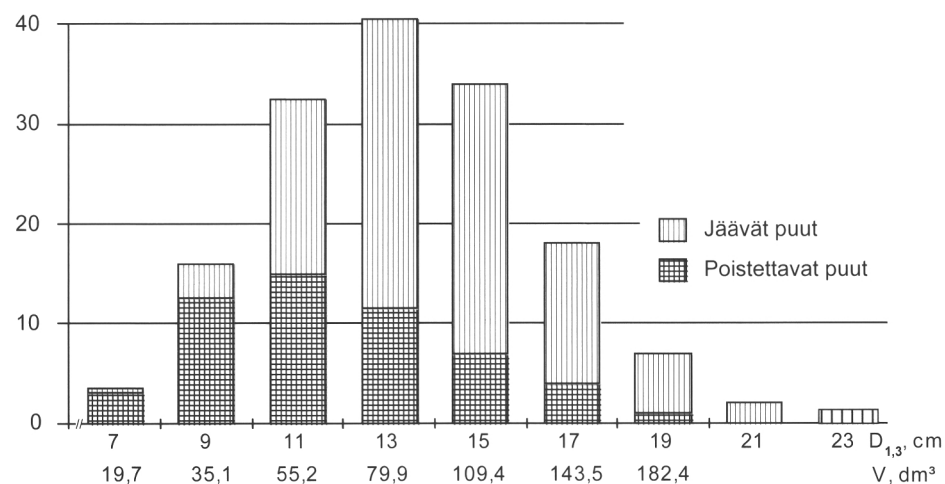
Harvennushakkuitten taloudellisia vaihtoehtoja ja toteuttamista selvittellyt työryhmä suosittelee ensiharvennusten myöhäistämistä kehitysvaiheeseen, jossa metsikön pituus on jo 13 m (Harvennushakkuiden... 1992). Edellytyksenä on myös edeltävän taimikonharvennuksen myöhäistäminen ja voimakkuuden lisääminen. Ensiharvennuksissa poistettavan puuston keskikoko ja hakkuukertymä ovat täten kohoamassa, aluksi lähinnä metsäteollisuuden metsissä. Nuorten metsien kehityshistoriasta johtuen kulunee kuitenkin ainakin 10 vuotta, ennen kuin ensiharvennusleimikoitten rakenne muuttuu yksityismetsissäkin merkittävästi.

Runkoja kpl, ha



Kuva 15. Kasvatettavien ja poistettavien puitten runkoluvun rinnankorkeusläpimittaluokittainen jakauma esimerkileimikossa.

Tilavuus, m³/ha



Kuva 16. Kasvatettavien ja poistettavien puitten kuorellisen runkotilavuuden rinnankorkeusläpimittaluokittainen jakauma esimerkileimikossa.

3.3.2 Runkohukkapuu

Poistuman jakautuminen kertymän ja hukkapuun kesken riippuu toisaalta puun pituudesta, läpimitasta ja runkomuodosta sekä toisaalta puutavaran pituus- ja läpimittavaatimuksista. Mitä suurempi vähimmäispituus vaaditaan, sitä suurempi osuus rungosta menetetään, joskin läpimittaluokittainen hukkaosuus vaihtelee leimikkokohtaisesti rungon pituuden ja pölkyn pituuden yhteentäsmäytymisestä riippuen. Kaikki kuitupuun ostajat eivät noudata samoja mittavaatimuksia, ja samakin ostaja saattaa soveltaa eri tilanteissa eri ohjeita.

Taulukko 11. Runkohukkapuun pituus, kuorellinen tilavuus sekä suhteellinen osuus koko rungon kuorellisesta tilavuudesta rinnankorkeusläpimittaluokittain ensiharvennumännikössä kuitupuupölkyn vähimmäisläpimittavaatimuksesta riippuen Laasa-senahon (1982) runkofunktioilla laskettuna. Pölkyn apteerausohje 5+3 m.

Rungon D _{1,3} , cm	Vähimmäis- latvaläpimitta, cm	Tähteeksi jäävä latvakappale		Osuus, %
		Pituus, m	Tilavuus, dm ³	
7	5	7,6	14,8	75,1
9	5	3,2	2,5	7,0
11	5	2,8	2,0	3,6
13	5	2,5	1,7	2,2
15	5	2,3	1,8	1,7
17	5	2,3	2,2	1,5
7	6	9,0	19,7	100,0
9	6	4,7	6,3	17,9
11	6	3,5	3,8	6,9
13	6	3,1	3,2	4,0
15	6	2,8	2,8	2,6
17	6	2,6	3,0	2,1
7	7	9,0	19,7	100,0
9	7	10,1	35,1	100,0
11	7	4,5	7,1	12,9
13	7	3,7	5,5	6,8
15	7	3,3	4,7	4,3
17	7	3,0	4,3	3,0
7	8	9,0	19,7	100,0
9	8	10,1	35,1	100,0
11	8	6,4	17,6	31,8
13	8	4,5	9,0	11,3
15	8	3,9	7,5	6,8
17	8	3,5	6,5	4,5

Taulukko 12. Runkohukkapuun osuus poistetun puuston kuorellisesta runkotilavuudesta kuitupuun pituus-, latvaläpimitta- ja rinnankorkeusläpimittavaatimuksesta riippuen kuvien 15 ja 16 mukaisessa ensiharvennusmännikössä. Rinnankorkeusläpimitta 2 cm:n tasaavalla luokituksella.

Latvan läpimitta- vaatimus, cm	Metsurihakkuu, pölkyn pituus 3 + 2,5 m			Koneellinen hakkuu, pölkyn pituus 5 + 3 m		
	Pienin D _{1,3} -luokka, cm			Hukkarunkopuun osuus, %		
	7	9	11	7	9	11
5	8	13	32	8	10	31
6	15	16	36	14	14	33
7	25	25	38	35	35	35
8	41	41	41	42	42	42

Tässä tutkimuksessa kuorellisen runkohukkapuun määrä on laskettu runkofunktioidella ensisijaisesti koneellisen hakkuun 5+3 m:n apteerausohjetta noudattaen. Vähimmäisvaatimuksena on, että rungosta saadaan ainakin yksi 5 m:n perusmitan täyttävä pölkky, minkä jälkeen voidaan ottaa käyttöön lyhyempi 3-5 m:n apumitta. Mitä suurempi on perusmitan ja apumitan ero, sen tarkemmin saadaan runkopuu talteen. Runkohukkapuun pituus, tilavuus ja suhteellinen osuus supistuvat puun koon kasvaessa ja mittavaatimusten lieventyessä (taulukko 11).

Taulukko 12 osoittaa vähimmäislatvaläpimitan ja pituusohjeen vaikutuksen hukkarunkopuun määrään. Metsurihakkuun ja koneellisen hakkuun apteeraussäännöt johtavat lähes samaan hukkapuuosuuteen. Poikkeuksena on kuitenkin vaihtoehto, jossa pölkyn latvaläpimittavaatimus on 7 cm. Silloin metsurihakkuun apteerausohje on esimerkkileimikon tapauksessa selvästi edullisempi.

Seuraava taulukkoon 12 perustuva laskelma osoittaa runkopuukertymän lisäyksen esimerkkileimikossa, kun pölkyn kuorellinen vähimmäisläpimittavaatimus alennetaan 7 cm:stä 5 cm:iin ja sovelletaan koneellisen korjuun 5+3 m:n apteerausohjetta ja 9 cm:n läpimittaluokkavaatimusta (vähimmäispaksuus 8 cm) rinnankorkeudella. Hyöty riippuu puuston järeydestä ja runkomuodosta eikä ole kaikissa leimikoissa välttämättä niin suuri kuin tässä laskelmassa.

Rungon D _{1,3} , cm	Poistuma m ³ /ha	Pölkyn vähimmäisläpimitta		Läpimitan alentamisen tuottama kertymähyöty %
		7 cm	5 cm	
		Kertymä, % koko rungosta		
9	12,0	0,0	93,0	
11	14,5	87,1	96,4	10,7
13	11,0	93,2	97,8	4,9
15	7,4	95,7	98,3	2,7
17+	3,8	97,2	98,5	1,5
Leimikko	48,7	69,1	96,5	39,6

Läpimitaltaan alle 10 cm:n puitten osuudella runkolukusarjassa on kertymäsuhteitten kannalta keskeinen merkitys. Ei siis ole yhdentekevää, millaista rinnankorkeus- ja latvaläpimittavaatimusta ensiharvennuspuulle sovelletaan. Vähimmäislatvaläpimitan alentaminen ei kostaudu kuoriosuuden kasvun tai puuaineen tiheyden alenemisen kautta, kuten usein oletetaan. Leimikkokohtainen kuitupuukertymä sen sijaan kasvaa merkittävästi kuitupuun laadun silti juurikaan kärsimättä.

Yksioteharvesterin yksikkökustannus alenee ensiharvennusleimikossa, jos kuitupuun latvaläpimittavaatimus pudotetaan 5 cm:iin. Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 10 cm:n puitten runkokohtainen ajanmenekki kasvaa näet vain 1-2 sekuntia eli 4-6 %, samalla kun runkokohtainen kertymä kasvaa 2-11 %. Latvaläpimitan alentamisen kautta korjuukelpoisiksi muuttuvilla, rinnankorkeusläpimitaltaan 8-10 cm:n puilla suhteellinen ajanmenekki on toki suurempi, mutta kun hakkuukoneen kasaamien taakkojen koko ja pinta-alakohtainen kertymä karttavat, kuormatratkatorin kuljetustuotos toisaalta paranee. Leimikkokertymän näin paisuessa myös kuutiometriä kohti lasketut työmaan suunnittelun, konesiirtojen ja organisaation kustannukset kevenevät. Rinnankorkeusläpimittavaatimuksesta tinkiminen vielä 8 cm:stä alaspäin ei sen sijaan liene kuituteollisuuden raaka-aineen osalta perusteltua hankintakauppoja ehkä lukuun ottamatta, sillä niin pienillä puilla hakkuun kustannukset kohoavat jyrkästi.

4 Tehostetun talteenoton vaikutus maan ravinnevaroihin

Puutavaran korjuu rikkoo metsän ekologisen tasapainotilan. Kun poistetaan myös latvusmassaa, häiriöt vakavoituvat. Metsikön ravinnemenetykset kasvavat, mikä saattaa johtaa maan tuotospotentiaalin taantumiseen. Kuten kasvupaikan viljavuutta voidaan väliaikaisesti parantaa lannoittamalla, sitä saatetaan myös köyhdyttää liian perusteellisen talteenoton kautta.

Mälkösen (1974) tutkimustuloksista koostettu taulukko 13 osoittaa, että *erityisesti neulaset ovat ravinnerikkaita*. Kuorelliseen runkopuuhun verrattuna niiden typpipitoisuus on 12-kertainen, fosforipitoisuus 7-kertainen, kaliumpitoisuus 10-kertainen ja kalsiumpitoisuus 4-kertainen.

Taulukko 14 osoittaa pääravinteitten jakautumisen poistettavan puuston maanpäällisten komponenttien kesken. Typestä ja fosforista 37 %, kaliumista 43 % ja kalsiumista 54 % on kuorellisessa runkopuussa, kun myös markkinakelvoton alamittainen latva lasketaan mukaan. Muu osa ravinteista on latvusmassassa.

Jos ensiharvennumänniköissä perinteisen tavaralajimenetelmän sijasta käytetään kokopuunakorjuuta, ravinnehävikki saattaa ääritapauksessa jopa yli kolminkertaistua. Tästä ovat esimerkkinä Kukkolan ja Mälkösen (1993) esittämät teoreettiset lukusarjat, joissa kuitupuun vähimmäisläpimitta on tavaralajimenetelmässä 6 cm. Kokopuumenetelmää edustaneessa koejärjestelyssä biomassa tosin otettiin talteen tehokkaammin kuin käytännössä on mahdollista:

	N	P	K	Ca	Mg
	Kerroin				
Kokopuumenetelmän ravinnetappio verrattuna tavaralajimenetelmään	3,6	3,5	3,0	2,4	2,4

Harvennuksen jälkeen yksityisen puun kasvu kiihtyy, kun sen latvukselle ja juuristolle avautuu uutta tilaa ja hakkuutähteistä alkaa vapautua ravinteita. Jos hakkuupoistuman biomassa otetaan talteen kokonaisuudessaan eikä tähteitä jätetä, ravinteita ei vapaudu. Siksi katsotaan, että tähteitten poisto vaikuttaa kielteisesti harvennuksen jälkeiseen kasvuun.

Hakkuutähteitten poistamisella on ravinnehävikin lisäksi muitakin harvennumetsikön kasvuun ja ekologiseen tilaan epäsuorasti vaikuttavia seurauksia. Se saattaa muuttaa metsämaan mikroilmastoa ja mikrobitoimintaa, happamoittaa maaperää ja hidastaa humuskerroksen typen mineralisoitumista. Hakkuutähteitten puuttuminen saattaa myös suosia puitten kanssa ravinteista kilpailevaa pintakasvillisuutta (Jacobson ym. 1995).

Taulukko 13. Ensiharvennusmännyn ravinnepitoisuus kolmen metsikön keskiarvona Mälkösen (1974) mukaan. Komponenttien paljousuhteet tästä tutkimuksesta.

Biomassakomponentti	N	P	K	Ca
	Pitoisuus kuivamassassa, %			
Runkopuu	0,066	0,0050	0,035	0,057
Rungon kuori	0,363	0,0547	0,214	0,454
Runkopuu kuorineen	0,097	0,0102	0,054	0,099
Elävien oksien puu+kuori	0,411	0,0504	0,205	0,280
Neulaset	1,193	0,1268	0,516	0,410
Elävä latvus	0,676	0,0763	0,311	0,324
Kuolleet oksat	0,298	0,0160	0,037	0,201
Koko latvus	0,596	0,0634	0,253	0,298
Koko puu	0,206	0,0218	0,097	0,125

Taulukko 14. Ravinteitten jakautuminen ensiharvennusmännyn biomassa-komponenttien kesken. Pitoisuudet kolmen metsikön keskiarvona Mälkösen (1974) mukaan, komponenttien paljousuhteet tämän tutkimuksen aineistosta (koko puu =100).

Biomassakomponentti	Osuus massasta, %	N	P	K	Ca
		Osuus koko puun ravinteista, %			
Runkopuu	69,9	22,3	16,0	25,1	28,0
Rungon kuori	8,2	14,4	20,5	18,0	26,2
Runkopuu kuorineen	78,1	36,7	36,5	43,1	54,2
Elävien oksien puu+kuori	11,4	22,7	26,3	24,0	22,4
Neulaset	5,9	33,9	33,9	31,1	16,9
Elävä latvus	17,3	56,6	60,2	55,1	39,3
Kuolleet oksat	4,6	6,7	3,3	1,8	6,5
Koko latvus	21,9	63,3	63,5	56,9	45,8
Koko puu	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Ravinnehävikin seuraukset ovat hidas- mutta pitkävaikutteisia. Tähteitten poisto saattaa alkaa vaikuttaa vasta vuosien viipeellä, sillä esimerkiksi typen nettomineralisoituminen neulasista saavuttaa avohakkuualallakin huipputasonsa vasta 3-6 vuoden kuluttua hakkuusta, ja oksapuusta typpi ja fosfori alkavat vapautua vasta vuosikymmenen kuluttua (Staaf 1984). Tehostetun talteenoton vaikutusten selvittäminen edellyttää pitkäaikaisia kenttäkokeita.

Metsäntutkimuslaitoksen koealasarjoissa äärimmäisen tehokkaanakaan toteutettu kokopuunakorjuu ei vaikuttanut ensiharvennusta seuranneen kymmenvuotiskauden aikana neljän männikön kasvuun, mutta kolmen kuusikon vuotuinen kasvu sen sijaan taantui keskimäärin 1,4 m³/ha. Kun hakkuun jälkeen levitettiin seoslannoitteen muodossa tyypeä 180 kg, fosforia 36 kg ja kaliumia 72 kg hehtaarille, tavaralajimenetelmällä ja kokopuumenetelmällä korjatut männiköt reagoivat samalla tavalla lannoitukseen (Kukkola & Mälkönen 1993):

Männikön käsittely ensiharvennuksessa	Kasvu harvennusta seuranneella 10-vuotiskaudella, m ³ /ha/a
Ainespuun korjuu, ei lannoitusta	4,8
Kokopuun korjuu, ei lannoitusta	4,8
Ainespuun korjuu, lannoitus	6,7
Kokopuun korjuu, lannoitus	6,6

Yhteispohjoismaisessa tutkimuksessa kokopuunakorjuu supisti ensiharvennusmännikön pohjapinta-alan kasvua kymmenvuotiskauden aikana keskimäärin 2 %. Tutkijaryhmä odottaa vaikutuksen voimistuvan, kun tavaralajimenetelmällä korjattujen koealojen hakkuutähteen ravinteet vapautuvat (Jacobson ym. 1995). Norjassa on eräissä tutkimuksissa todettu kokopuunakorjuun alentaneen männikön tuotosta 10 % (Brantseg 1962, Tveite 1983).

Suomalaiset kokeet eivät siis ole toistaiseksi paljastaneet hälyttäviä tuotostappioita ensiharvennusmänniköissä, vaikka biomassassa on poistettu perusteellisemmin kuin käytännön korjuutyömailla on mahdollista. Ennen pitkää kasvu saattaa kuitenkin alkaa heikentyä, ja siitä syystä on ainakin toistaiseksi *vältettävä metsämaan ravinnetasapainon radikaalia järkyttämistä*. Poistettujen ravinteiden korvaaminen lannoittaen aiheuttaisi huomattavia lisäkustannuksia, eikä sitä kautta voitaisi torjua hivenravinnemenetyksiä. Myös ekosysteemin monimuotoisuus edellyttää, että hakkuualalle jää kuollutta biomassaa.

Sen sijaan että otettaisiin talteen kaikki biomassassa ja turvauduttaisiin korvaavaan lannoitukseen, *tulee etsiä rationaalisia korjuuteknisiä ratkaisuja*, joilla osa latvusmassasta voidaan hyödyntää energian lähteenä ja tarvittava osa jättää kasvupaikalle. Luvussa 5 päädytään yleissuositukseen, jonka mukaan *läpimitaltaan alle 5 cm:n latva oksineen tulisi jättää tähteenä metsään*. Viljavilla mailla jättövaatimus voi itse asiassa olla lievempi, mutta ekologisesti arimmilla mailla, kuten esimerkiksi köyhillä kanervakankailla ja rämeillä, latvusmassaan ei tule kajota. Viljavilla kasvupaikoilla hakkuun kohteena on toisaalta yleensä kuusi, jolla neulasmassaa on paljon enemmän kuin männyllä ja kokopuunakorjuun ravinnetappio siitä syystä tuntuvampi.

5 Potentiaalinen kuitupuu ja ensisijainen energiapuu

Ensiharvennusmännyn pääasialliset käyttökohteet ovat sulfaattimassateollisuus ja energian tuotanto. Myös käyttö mekaanisen massan raaka-aineeksi saattaisi olla mahdollista sydänpuun puuttumisen ansiosta. Koska massateollisuuden puustamaksukyky on ylivertainen energiatalouteen verrattuna, ja koska pienikokoisen puun käytöstä saatavat hyödyt kertaantuvat kansantaloudessa tehokkaimmin nimenomaan massa- ja paperiteollisuuden kautta, *tavoitteena on ohjata mahdollisimman suuri osa kertymästä kuitupuuksi.*

Ensiharvennusmännyn puuaineen tiheys ja kuidun pituus muuttuvat puun tyveltä latvaa kohti massateollisuuden kannalta epäedulliseen suuntaan. Kuitenkin vielä 5 cm paksu latvapuu soveltuu kuidutukseen, joskin se tulisi ensisijaisesti ohjata tuotteisiin, joissa poikkeavat ominaisuudet ovat pikemminkin hyödyksi kuin haitaksi. Seuraavat lukusarjat osoittavat ensiharvennusmännyn ominaisuudet koko rungossa keskimäärin sekä latvassa 5 cm:n läpimitan kohdalla:

	Koko rungon keskiarvo	Arvo rungon läpimitan alittaessa 5 cm
Kuoren tilavuusosuus, %	15,4	17,1
Kuoren kuivamassaosuus, %	10,1	13,6
Kuorettoman puun kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	395	372
Kuorellisen puun kuiva-tuoretiheys, kg/m ³	376	354
Puuta kuorellisessa kuutiometrissä, kg/m ³	335	308
Asetoniin liukenevia uuteaineita puussa, %	3,3	3,3
Kuidun pituus, mm	2,3	1,8
MWh/kuorellinen m ³ 40 %:n kosteudessa	1,85	1,75

Mäntykuitupuun vähimmäisläpimitta nostettiin 1990-luvun alkupuolella 6 cm:stä 7 cm:iin korjuu- ja kuorintateknisistä ja osaksi ehkä puumarkkinapoliittisistakin syistä. Rajaukseen lienee vaikuttanut myös käsitys latvapuun teknisten ominaisuuksien kehnoudesta. Asetelma osoittaakin, että kuorellisen kuutiometrin puuainesisältö on 5 cm:n latvaläpimitan kohdalla 8 % alempi ja kuidun pituus noin 20 % lyhyempi kuin ensiharvennusmännynsä keskimäärin.

Latvaläpimitan alentaminen 5 cm:iin lisäisi kuitenkin ensiharvennusmännyn kertymäpotentiaalia, poistettavien puitten rinnankorkeusläpimittajakaumasta riippuen eräissä leimikoissa jopa kymmeniä prosentteja. Samalla korjuun yksikkökus-

tannukset saattaisivat jopa laskea, mikä ainakin osaksi kompensoisi latvaosan alhaisempaa puupitoisuutta. Metsäteho ja Keskuslaboratorio Oy ovat selvittäneet mäntykuitupuun läpimitan vaikutusta sulfaattisellun tuotantokustannuksiin ottaen huomioon sekä puutavaran hankinnan että sellun valmistuksen kustannukset ja tuotteen saannon. Kun vähimmäislatvaläpimitta oli 7 cm, sellun suhteellinen kustannus oli päätehakkuualojen mäntypuulla 100, myöhäisen harvennuksen mäntypuulla 109 ja ensiharvennusleimikoitten mäntypuulla 124, jotka erot pyritään ottamaan huomioon puutavaran kantohinnoissa. Kun ensiharvennusmännyn latvaläpimittaa alennettiin 7 cm:stä 5 cm:iin, sellun tuotantokustannus nousi vielä 3 %, mutta tuolloin laskentamallissa alennettiin latvaläpimitan keralla vastaavasti myös rinnankorkeusläpimittaa (Korpilahti ym. 1995).

Kehitystyön lähtökohdaksi voidaan asettaa, että *ensiharvennusmänniköitten runkopuu on 5 cm:n latvaläpimitaan saakka potentiaalista kuitupuuta*. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 8 cm:n rungot (rinnankorkeusläpimittaluokka 7 cm) ovat metsänomistajan hankintahakkuita lukuun ottamatta kustannussyistä kuitenkin kuitupuuksi korjuukelvottomia, mutta ne voidaan lukea energiapuuhun.

Alle 5 cm:n paksuinen latvapuu, rungon kuori sekä latvusmassa ovat ensisijaista energiapuuta. Metsämaan ravinnetasapainon säilyttäminen sekä metsäekosysteemin monimuotoisuuden vaaliminen kuitenkin edellyttävät, että osa biomassasta jätetään metsään. Miten paljon tähdettä tulee jättää, riippuu kasvupaikan viljavuudesta. Enso-Gutzeit Oy:n Itä-Suomessa kokeilema osapuunakorjuun menettely, jossa läpimitaltaan alle 5 cm:n paksuinen latvapuu ja siihen liittyvä latvusmassa jätetään hakkuualalle, on sekä puu-, kertymä- että korjuuteknisten näkökohtien ja kasvupaikan ekologian kannalta perusteltu.

Edellä kuvatun jaon puitteissa keskimääräisessä Etelä-Suomen ensiharvennusmännikössä *potentiaalisen kuitupuun osuus on 83 % rungon kuorellisesta kuivamassasta ja 65 % puun kaikesta maanpäällisestä kuivamassasta*. Muu biomassassa on ensisijaista energiapuuta, josta alle 5 cm paksu rungon latvaosa oksineen siis kuitenkin suositellaan jätettäväksi kasvupaikalle (taulukko 15).

Käyttösuosituksen mukaan tyypillisessä Etelä-Suomen ensiharvennusmännikössä 21,4 % puun maanpäällisestä kuivamassasta kannattaa käyttää energian tuotantoon. Lähes viidennes siitä on kuivia oksia, joilla on taipumus murtua puutavaraa käsiteltäessä ja joista siksi vain vähäinen osuus voidaan todellisuudessa kerätä talteen. Käytännössä energiapuun joukkoon joutuu toisaalta myös potentiaalista kuitupuuta ja kuitupuusta tehdyn selluhakkeen joukkoon energiapuuta, kuitenkin sitä vähemmän mitä paremmin tekniikka onnistutaan sopeuttamaan ensiharvennusmännyn erityisominaisuuksiin.

Taulukko 15. Poistettavan biomassan (kuivamassa) jako potentiaaliseksi kuitupuuksi, ensisijaiseksi energiapuuksi ja suositeltavaksi metsätähdeosuudeksi Etelä-Suomen ensiharvenusmänniköissä. Kuitupuupölkyn perusmitta 5 m ja apumitta 3 m+.

Biomassakomponentti	Kaikki biomassa	Potentiaalinen kuitupuu Osuus kaikesta biomassasta, %	Ensisijainen energiapuu	
			Metsään jätettävä	Energia- käyttöön
Yli 5 cm paksu rungonosa:				
Runkopuu	64,8	64,8		
Rungon kuori	7,2			7,2
Elävien oksien puu+kuori	6,6			6,6
Neulaset	3,0			3,0
Kuolleet oksat	4,6			4,6
Yhteensä	86,2	64,8		21,4
Alle 5 cm paksu rungonosa:				
Runkopuu	5,2		5,2	
Rungon kuori	1,0		1,0	
Elävien oksien puu+kuori	4,8		4,8	
Neulaset	2,8		2,8	
Yhteensä	13,8		13,8	
Koko puu	100,0	64,8	13,8	21,4

Luvussa 1.2 esitetyn arvion mukaan mäntyvaltaisten ensiharvenusmetsien mäntyrunkopuun vuotuinen hakkuupotentiaali on Etelä-Suomessa 3,4 milj. m³ eli 1,28 milj. t rungon kuorellista kuivamassaa ja latvus mukaan luettuna yhteensä 1,63 milj. t kokopuun kuivamassaa vuodessa. Kuitupuun päälle jäävä energiapotentiaali on pienempi kuin yleisesti on arvioitu, asetelman mukaan 0,35 milj. t kuivamassaa eli energia-arvoltaan 1,80 TWh vuodessa.

Suositeltava käyttökohde	Etelä-Suomen mäntyvaltaisten ensiharvenusleimikoitten mäntypuun tavoitepoistuma		
	Tilavuus milj. m ³ /a	Kuivamassa milj. t/a	%
Kuitupuu kuoretta	2,6	1,06	65
Energiapuu	0,9	0,35	21
Hakkuutähde	0,5	0,22	14
Biomassa yhteensä	4,0	1,63	100

Asetelma sisältää vain Etelä-Suomen mäntyvaltaisten ensiharvenusleimikoitten mäntypuuston. Se ei sisällä kuusi- ja lehtipuuvaltaisista ensiharvenusleimikoista saatavaa mäntypuuta (noin 0,5 milj. m³/a) eikä myöskään mäntyvaltaisista leimikoista poistettavaa kuusi- ja lehtipuuta. Laskelmassa ei ole otettu huomioon sitä, että osa metsistä on jäämässä hakkuutoiminnan ulkopuolelle.

6 Energiapuun erottaminen kuitupuusta

Pienikokoisen puun hyväksikäyttöä ryhdyttiin 1970-luvulla edistämään kokopuunakorjuun ja kokopuuhaketuksen keinoin (Hakkila 1989). Kokopuuhakkeen puhdistamiseen panostettu tutkimus- ja kehitystyö ei kuitenkaan johtanut kuituteollisuutta tyydyttävään tulokseen. Ongelmana olivat erityisesti kokopuuhakkeen puhdistuslaitosten korkeat investointikustannukset, riittämätön kapasiteetti sekä suuri puunhukka.

Ruotsin metsäteollisuus alkoi silloin kokopuuhaketusten sijasta panostaa *osapuumenetelmään, jossa karsimattomana korjatun pienpuuraaka-aineen jako kuitu- ja energiapuuksi tapahtuu jo ennen hakettamista*. Ruotsiin perustettiin vuosina 1972-1984 kaikkiaan 18 laitosta, joissa pienikokoinen kuitupuuta karsittiin ja kuorittiin kuivarummuissa. Osa laitoksista integroitui välittömästi sellutehtaan puunkäsittelyjärjestelmään, osa taas muodosti itsenäisen terminaalin. Viimeksi mainituista 10 rakennettiin 1980-luvun alkupuoliskolla valtion myöntämän 35 %:n investointituen turvin (Hillring 1995). Tyypillinen tekninen ratkaisu oli kuivarumpu, joka jakautui vastakkaisiin suuntiin pyöriviin peräkkäisiin lohkoihin.

Ruotsin osapuuterminaalien kilpailukyky ensiharvennusleimikoitten korjuuratkaisuna heikentyi 1980-luvun jälkipuoliskolla puupolttoaineitten reaalihinnan laskiessa, teollisuuspuun saatavuuden parantuessa mm. tuonnin ansiosta, yksiotetarvesterien kehityessä sekä kuitupuun laatuvaatimusten kiristyessä. Korjuuorganisaatioita ei kaikissa tapauksissa onnistuttu sopeuttamaan tyydyttävästi osapuun hankintaan, eikä terminaalitekniikkaa juurikaan kehitetty viimeksi kuluneen kymmenvuotiskauden aikana. Siksi terminaalit jäivät kehityksessä jälkeen, ja useat niistä on suljettu. Muutamat toimivat kuitenkin edelleen kannattavasti (Hillring 1995). Hakkuukaudella 1989-1990 terminaalit käsittelivät yhteensä 646500 m³ biomassaa, josta 60 % päättyi kuitupuuksi ja 40 % energiakäyttöön (Brunberg 1991).

Myös Pohjois-Amerikassa tultiin lukuisten tutkimusten, kokopuuhakkeen puhdistamiseen rakennettujen pilot-laitosten ja tehdaskokeitten perusteella 1980-luvun jälkipuoliskolla johtopäätökseen, että kuitu- ja energijakeet tulee erottaa ennen haketusta. Edulliseksi ratkaisuksi osoittautui välivarastolla tapahtuva ketjukarsinta-kuorinta, johon sittemmin liitettiin myös haketus. Ensimmäiset ketjukarsinta-kuorijat otettiin käyttöön 1980-luvun lopussa, ja vuonna 1995 niitä oli USA:ssa ja Kanadassa käytössä jo satoja. Kanadassa menetelmä on kuitupuun läpimitan pienentyessä ja laatuvaatimusten kiristyessä kuitenkin alkanut jo menettää jalansijaa. Ketjukarsinta-kuorintaprosessissa syntyvän tähteen jälkikäsitteilyyn on tarjolla tehokkaita murskaimia, mutta fossiilipolttoaineitten edullisuuden vuoksi prosessitähdettä ei Amerikassa yleensä hyödynnetä.

Metsäntutkimuslaitoksessakin on kolmen vuosikymmenen aikana tehdyn pienpuututkimuksen perusteella päädytty siihen, että ensiharvennusleimikoista karsituna tai karsimattomana korjatun kuitu- ja energiapuun erottelu onnistuu parhaiten ennen haketusta. Bioenergian tutkimusohjelmassa Metsäntutkimuslaitos lähtee kehitystyössään tältä pohjalta. Samanaikaisesti VTT Energia kehittää kokopuu-hakkeen lajittelutekniikkaa ns. massahakemenetelmällä, jonka keskeisiä komponentteja ovat kuoren murskaamiseen tähtäävä hakepalasten levyhierrin sekä optinen värierottelija (Seppänen & Ahonen 1995). Vuonna 1995 Kankaanpään Massahake Oy käynnisti tähän tekniikkaan perustuvan kokopuu-hakkeen puhdistuslaitoksen, jonka on rakentanut BMH Wood.

Metsäntutkimuslaitoksessa tutkimuksen kohteina ovat reikäroottorikuorinta, rumpukuorinta, ketjukarsinta-kuorinta sekä ketjukarsinta-kuorinnan ja rumpukuorinnan yhdistelmä. Tätä ohjelmaa toteutetaan yhteistyössä Metsätehon, Pertti Szepaniak Oy:n, Enso-Gutzeit Oy:n ja Enocell Oy:n kanssa. Järjestelmien tekninen kehittäminen jatkuu edelleen, eivätkä seuraavassa esitettävät tulokset ole suinkaan lopullisia. Bioenergian tutkimusohjelman puitteissa on tulossa kokeiluvaiheeseen myös aivan uusia ratkaisuja, joista mainittakoon Hooli Oy:n autosovitteinen ketjukarsija-kuorijan ja energiamurkaismen yhdistelmäkone.

6.1 Reikäroottorikuorinta

Kuituteollisuuden alkuaikoina raaka-aine kuorittiin yksin puin, jota tekniikkaa edustaa nykyisin reikäroottorikuorinta. Tuottavuus määräytyy syöttönopeuden, pölkkyjen läpimitan ja piteuden sekä pölkkyvirran katkeamien tuloksena. Tehokkuus edellyttää taakanhajottajalta ja syöttökuljettimelta häiriötöntä toimintaa ja katkeamatonta puuvirtaa. Menetelmän etuja ovat kevyet investointikustannukset, hyvä kuorintajälki, vähäinen puunhukka, kuorintatähteen säilyminen kuivana sekä mahdollisuus vaihtaa joustavasti tavaralajista toiseen. Mutta ohuilla puilla tuottavuus jää pieneksi, mutkaiset pölkkyt tuottavat ongelmia eikä tekniikka sovellu karsimattomille puille.

Reikäroottorikoneessa kuorintaterät on kiinnitetty pyörivään renkaaseen. Kuorinta tapahtuu kaapimalla terien pyöristetyillä kärkisivuilla, joitten keskelle jäävän aukon läpi pölkkyt kulkevat peräkkäin. Puuhun kohdistuva puristus säädetään kuorintavastuksen mukaan. Roottorin molemmin puolin pölkkyt ovat syöttörullien otteessa, niin että ne eivät pääse pyörimään terien mukana.

Siirreltäviä maataloustraktori- ja kuorma-autosovitteisia reikäroottorikoneita käytettiin 1960- ja 1970-luvuilla yleisesti kuitupuun kuorintaan metsävarastoilla, mutta ne ovat joutuneet väistymään joukkokäsittelyyn nojautuvien tehdaskuorimoitten tieltä. Sen sijaan saha- ja vaneriteollisuuden raaka-aine kuoritaan edelleen kiinteillä reikä-roottorikoneilla.



Kuva 17. Pertti Szeponiak Oy:n kuitupuun reikäroottorikuorinta-asema Imatralla.

Pertti Szeponiak Oy rakensi vuonna 1992 Imatran Kurkvuoreen kuitupuun kuorinta- ja haketusterminalin, jossa sovelletaan reikäroottoritekniikkaa (kuva 17). Kuorinta tapahtuu Valon Kone Oy:n VK480-2R koneella, jossa on peräkkäin 2 vastakkaisuuntiin pyörivää reikäroottoria. Puut siirretään varastopinosta tai suoraan ajoneuvosta nosturilla kiramolle, joka hajottaa taakan ja annostelee pölkyt yksin kappalein kuorimakoneen syöttökuljettimelle. Terminaalia hoitamaan tarvitaan 2 miestä, joista toinen käyttää nosturia ja toinen valvoo kuljettimien, kuorimakoneen ja hakkurin toimintaa sekä siirtää prosessitähteen pyöräkuormaajalla varastokasalle.

Kaksoisroottoriratkaisulla varmistetaan hyvä kuorintajälki suurellakin syöttönopeudella. Helppoissa oloissa ja huoltotöitten aikana tullaan toimeen yhdelläkin roottorilla. Suurin syöttönopeus on 100 m/min, mutta syöttökatkosten vuoksi tehollinen käsittelynopeus jää aina pienemmäksi. Jos puuvirran katkosten osuus on 30 % työajasta, teoreettinen tuottavuustaso on seuraava:

Pölkyn keskimääräinen läpimitta kuoren alla, cm	Säädetty syöttönopeus, m/min	
	80	100
	Tuottavuus kuoretonta haketta, m ³ /h	
7,5	15	18
10,0	27	33
12,5	41	51
15,0	59	74

Kokeen tulokset

Peräkkäisessä yksittäissyötössä kuljettimelle jää pölkkyjen väliin kapasiteettia syövää tyhjää tilaa. Katkoksia aiheuttavat muun muassa pölkkyjen lomittaisuus kiramolla, lyhytten pölkkyjen suistuminen kuljettimelta, kahden pölkyn ajautuminen rinnakkain roottoriin sekä valokennon ohjaaman annostelijan häiriintyminen lumen, oksien tai muitten epäpuhtauksien vaikutuksesta. Kokeitten aikana terminaalien todellinen käsittelynopeus oli katkosten seurauksena noin 70 m/min, vaikka kuorimakoneen syöttönopeus oli 100 m/min.

Karsitulla ensiharvennusmännyllä terminaalien tehotuntituottavuus oli 51 m³ haketta, ja lisäksi syntyi energiakäyttöön soveltuvaa prosessitähdettä kuivamassana yli 2 t (taulukko 16). Normaalilla kuitupuulla tuottavuus oli järeämmän pölkkykoon ansiosta korkeampi, kahden kokeen keskiarvona vastaavasti 56 m³/h. Jos terminaalit toimii kahdessa vuorossa 215 työpäivää vuodessa ja jos keskeytysten osuus on 20 % työajasta, vuosikapasiteetti on ensiharvennusmännyllä kaksivuorotyössä 140 000 m³ kuoretonta haketta sekä 5500 t kuivamassaksi muunnettua prosessitähdettä. Jos ensiharvennuspuu jaetaan läpimitan perusteella kahteen osaan, niin että järeämpi osa kuoritaan reikäroottorikoneella ja ohuempi osa ohjataan joukkokäsittelyyn, ylletään selvästi korkeampaan tuotokseen.

Taulukko 16. Mäntykuitupuun kuorintakokeen tulokset Pertti Szepaniak Oy:n reikäroottorikuorimolla kolmessa eri kokeessa.

Muuttuja	Ensiharvennuspuu	Normaali kuitupuu	
	Marraskuu 1992	Maaliskuu 1995	Kesäkuu 1995
Koneen syöttönopeus, m/min	100	100	100
Todellinen nopeus, m/min	73	68	70
Tuottavuus/tehotunti			
Kuoreton hake, m ³	51	44	68
Prosessitähde kuivamassana, t	2,3	1,3	2,0
Hyväksytty palakoko hakkeesta, %	..	81,8	75,1
Hakkeessa kuorta, %	0,15	0,25	0,10
Runkopuun hävikki, %	2,90	1,73	1,41
Energiajäte syötteestä, %	11,2	7,2	8,4

Runkopuun kuorintahävikki oli ensiharvennusmännyllä 2,9% ja normaalikuitupuulla 1,6%. Pääosa hävikistä koostui pölkyn pinnasta lohkeilleista pienistä palasista, vähäinen osa roottorissa katkenneista pölkynpäistä. Hävikki oli kuusella saman-
suuruinen mutta koivulla suurempi.

Ensiharvennusmännystä tehdyn hakkeen kuoripitoisuus oli vain 0,15%. Enso-Gutzeit Oy:n järjestämässä erillisessä kokeessa ensiharvennusmännyn kuoripitoisuudeksi jäi -10C pakkasessa 0,75%. Samassa kokeessa todettiin, ettei yksioiteharvestereilla joukkokarsittu ensiharvennusmänty tuottanut reikäroottorikuorinnassa erityisiä ongelmia (Huovinen 1993).

6.2 Rumpukuorinta

Lähes kaikki kuitupuu kuoritaan nykyisin jatkuvasyöttöisessä pyörivässä rummussa, jossa pölkyt hankaavat ja kolhivat toisiaan. Liikettä tehostetaan rummun sisäpinnalle kiinnitetyillä ulokkeilla, jotka nostavat pölkkyjä rummun pohjalta mukaansa. Pölkkysuma kulkeutuu eteenpäin rummun loivan kaltevuuden vaikutuksesta.

Ristikkäisrummussa halkaisija on suurempi kuin kuitupuupölkyn pituus, niin että pölkyt voivat rummun pyöriessä kääntyillä minkä suuntaisesti tahansa. *Yhdensuuntaisrummussa* halkaisija on pölkyn pituutta pienempi, jolloin puut pysyvät rummun akselin suuntaisina. Ristikkäisrumpujen etuna on suuremman läpimitan ja täyttöasteen mahdollistama korkeampi kapasiteetti, tehokkaampi kuoriutuminen sekä parempi soveltuvuus mutkaisille pölkkyille. Yhdensuuntaisrummuissa taas puun hävikki jää pienemmäksi. Suomessa käytetään yleisimmin ristikkäisrumpuja.

Märkärummussa kuoriutumista nopeutetaan ja tehostetaan veden avulla, ja samalla supistetaan rummutuksen energiantarvetta. Jätevedestä aiheutuu kuitenkin ympäristöongelmia ja kustannuksia, ja se alentaa kuoren lämpöarvoa. *Kuivarummussa* veden käyttö rajoittuu lähinnä jäätyneen kuoren sulatteluun sekä kuorittujen pölkkyjen huuhteluun. Ympäristönsuojelullisten etujensa ansiosta kuivarummut ovat syrjäyttämässä märkärumpuja.

Ironnut kuori putoaa rummun seinämissä olevien aukkojen läpi kuljettimelle. Kuoriaukkojen leveys on yleensä 45-50 mm. Aukot laajenevat metallin kuluessa, mutta ne voidaan palauttaa alkuperäiseen leveyteensä hitsaamalla. Jos aukot ovat liian kapeita, prosessitähteen poistaminen vaikeutuu, mikä on osoittautunut ongelmaksi mm. karsimatonta osapuuta käsiteltäessä. Jos taas aukot ovat liian leveitä, niitten läpi työntyvät pölkynosat katkeavat ja joutuvat tähteen mukana polttoainekäyttöön. Näin pyrkii käymään nimenomaan ohuelle ensiharvennuspuulle.

Kun pölkköjä katkeilee ja pirstoutuu ja niitten päissä tapahtuu pensselöitymistä, potentiaalista kuitupuuta joutuu kuoren mukana energiakäyttöön. Tästä aiheutuu runkokuun kuorintahävikkiä, jonka suuruus riippuu puun lujuudesta, pölkyn pituudesta, läpimitasta, läpimittajakaumasta, mutkaisuudesta, tuoreudesta, pölkkyissä ehkä olevista murtumista sekä mahdollisesta jäätymisestä. Se riippuu myös rumpun teknisistä ominaisuuksista ja prosessisäädöistä, kuten täyttöasteesta, kierrosnopeudesta, sulkuesteellä säädettävästä puun viipymästä, veden käytöstä ja yleensäkin kuorinnan perusteellisuudesta.

Kuorintahävikkiä pidetään ensiharvennuspuun rumpukuorinnan keskeisenä ongelmana. Keskimääräinen hävikki voidaan mitata esimerkiksi prosessitähteen puupitoisuudesta, mutta tietyn pölkköryhmän seuraaminen ja erottaminen koko kuorintaerästä on vaikeata. Koetulokset ovat tehdaskohtaisia, eivätkä ne useinkaan ole yleistettävissä. Siitä syystä ensiharvennuspuun käyttäytyminen järeämmän kuitupuun joukossa tunnetaan huonosti.

Niemeläisen (1992) kirjallisuuskatsauksen mukaan normaalin kuitupuun rumpukuorintahävikki on 1-5 %. Pieniläpimittaisella ensiharvennuspuulla hävikki näyttää riippuvan pikemminkin pölkkyjen läpimittajakaumasta kuin keskimääräisestä läpimitasta. Kun rummussa on samanaikaisesti sekä järeitä että ohuita pölkkyjä, ohuet murskautuvat helposti. Jos kuoritaan pelkästään ohutta ensiharvennuspuuta, hävikki jää pienemmäksi. Tulos riippuu luonnollisesti kuitupuun vähimmäisläpimitasta ja pituudesta. Niirasen (1985) mukaan puuhäviöön voidaan vaikuttaa ennen kaikkea rummutettavan puuerän sisäisellä rakenteella.

Yleinen on käsitys, että ensiharvennuspuun kuorintahävikki kasvaa käytännössä jopa 10-20 %:iin, kun ensiharvennuspuu sekoittuu rummussa järeämpään kuitupuuhun. Taannoisessa matalasuhdanteessa tämä johti ensiharvennuspuun karttamiseen ja mäntykuitupuun vähimmäisläpimitan nostamiseen 7 cm:iin. Mutta toisaalta on tutkimusnäyttöä siitä, että rumpukuorinta voi tietyin edellytyksin johtaa hyvään tulokseen myös pieniläpimittaisella ensiharvennuspuulla. Enso-Gutzeit Oy:n Tainionkoskella tekemässä ensiharvennusmännyn rumpukuorintakokeessa puun hävikiksi mitattiin vain 0,7 % ja hakkeen kuoripitoisuudeksi 0,06 % (Hakala 1983). Eräessä ruotsalaisessarumpukuorintakokeessa ensiharvennuspuun hävikki oli harvesterilla yksinpuin karsitulla puulla 1,7% mutta joukkokarsitulla puulla kuitenkin 4,2 % (Jonsson 1989).

Käsillä olevassa tutkimuksessa etsitään lisätietoa siitä, miten eri tavoin karsittu ja erilaiseen vähimmäisläpimitaan tehty ensiharvennusmänty käyttäytyy perinteisessä rumpukuorinnassa. Kolmessa vuosina 1993 ja 1994 toteutetussa laajassa tehdaskoesarjassa tutkittiin karsitun ja karsimattoman ensiharvennusmännyn rumpukuorintaa eritoten kuitupuun hävikin, hakkeen kuoripitoisuuden ja palakokojakauman sekä energiapuun kertymän näkökulmasta.

6.2.1 Enocellin rumpukuorintakoe lokakuussa 1993

Enocell Oy:n Uimaharjun sulfaattisellutehtaan vuonna 1992 valmistunut kaksilinjainen kuivarumpukuorimo edustaa alan uusinta tekniikkaa. Kone Wood Oy:n toimitamien automaattisesti ohjautuvien Drummatic ristikkäisrumpujen pituus on 38 m, halkaisija 5,5 m ja pyörimisnopeus 3-7 rpm. Kuoriaukkojen leveys on rummun alkupäässä 50 mm ja loppupäässä 40 mm. Jäätynyt puu sulatetaan ennen rummutusta lämpimällä vesisuihkulla.

Kuoriutuneet pölyt putoavat rummusta purkusuisteen kautta kuljettimelle, joka vie ne edelleen laikkahakkuriin. Hakkeen laadun varmistamiseksi pituudeltaan alle 70 cm:n kappaleet ohjataan loukulla pystysyöttöiseen pätkehakkuriin. Murtuneitten pätkien erillishaketus supistaa hävikkiä ja parantaa hakkeen laatua. Hakeseula kierrättää pituudeltaan yli 65 mm:n aineksen tikkuhakkurin kautta. Purua ei poisteta.

Kuorimossa toteutettiin lokakuussa 1993 koe, jonka tarkoituksena oli selvittää karsitun ensiharvennumännyn käyttäytyminen toisaalta erilliskäsittelyssä omana tavalarajinaan sekä toisaalta sekakäsittelyssä päätehakuualalta korjatun mäntykuitupuun joukossa. Kokeen kulkua ja tuloksia on selostettu yksityiskohtaisesti Joensuun yliopiston erillisessä raportissa (Vesisenaho 1994).

Kokeen tulokset

Ensiharvennuspuun kuorintahävikki oli erilliskäsittelyssä 2-3 % eikä siis kohonnut niin korkeaksi kuin usein oletetaan. Joukkokarsitun ensiharvennuspuun hävikki oli suurempi kuin yksin puin käsitellyn. Joukkokarsinta ehkä aiheuttaa rungon sisäisiä murtumia, jotka sitten rummussa johtavat pölkyn katkeamiseen.

Seoserässä, jossa karsitun ensiharvennuspuun osuus päätehakuualan kuitupuun seassa oli 10 %, keskimääräinen kuorintahävikki oli 1,2 %. Vertailuarvoksi voidaan asettaa Uimaharjun kuorimolla myöhemmin tehdyssä kokeessa päätehakuualan kuitupuun keskimääräiseksi hävikiksi mitatattu 1,0 % (luku 6.2.3). Ensiharvennuspuu ei odotuksista huolimatta näytä nostattaneen kuorintahävikkiä sekakäsittelyssä enempää kuin sen seososuus sinänsä edellytti. Kun ensiharvennuspuuseos toisessa koeajossa koostui karsimattomasta osapuusta, hävikki kuitenkin kasvoi merkittävästi.

	Hävikki, % runkopuusta	Hakkeessa kuorta, %	Energia- jae, %
Yksin puin karsittu ensiharv.puu 100 %	2,26	0,04	10,1
Joukkokarsittu ensiharv.puu 100 %	3,01	0,08	11,7
Päätehakk. 90 % + yksin puin kars. ensiharv. 10 %	1,22	0,07	7,4
Päätehakk. 90 % + karsimaton ensiharv. 10 %	1,75	0,06	9,0

Taulukko 17. Hakkeen palakokojakauma Enocell Oy:n rumpukuorintakokeessa lokakuussa 1993.

Puutavara	Ylipitkä >45 mm	Ylipaksu >8 mm	Hyväksytty 7-45 mm	Neulahake 3-7 mm	Puru <3 mm
	Osuus kuivamassasta, %				
Ensiharvennuserät:					
Karsinta yksin puin	0,7	5,1	88,0	5,0	1,2
Joukkokarsinta	1,0	6,3	86,2	5,3	1,3
Seoserät (90 % + 10 %):					
Ensiharvennuspuu karsittuna (10 %)	0,7	5,0	88,6	4,5	1,2
Ensiharvennuspuu karsimattomana (10 %)	0,7	5,6	87,7	4,7	1,3

Hakkeen tekninen laatu oli kaikissa koe-erissä korkea. Kuoripitoisuus jäi alle 0,1 %:n. Kuorinta oli tarpeettomankin perusteellista, mikä on saattanut turhaan kasvattaa hävikkiä.

Edullinen oli myös hakkeen palakokojakauma, joka riippuu sekä puutavarasta että hakkurista ja seuloista. Tavoitteen mukaisesti palakokoluokkiin lankesi 88-89 % hakkeen kuivamassasta lukuun ottamatta joukkokarsittua puuta, jolla hyväksytyn palakoon osuus lukuisampien murtumapintojen seurauksena oli hieman pienempi, 86 %. Ylipaksua, 8 mm:n rakoseulalle jäänyttä haketta oli enemmän niissä erissä, joissa puutavarassa oli rumpuun saapuessaan jäljellä oksia. Oksanpätkistä näet lohkeaa helposti ylipaksuja paloja (taulukko 17).

Seoserissä kuorta jää lähinnä paksukaarnaisiin järeisiin pölkkyihin. Samalla kun paksut pölkkyt kuoriutuvat muita huonommin ne myös murtavat ohuita ensiharvennuspölkkyjä. Murtumat paitsi kasvattavat hävikkiä myös huonontavat palakokoja-kaumaa, sillä murtuneista poikkileikkauspinoista syntyy hakettaessa tikkuja.

Kokeen mukaan Enocell Oy:n kuorimossa voidaan menestyksellä käsitellä ensiharvennusmäntyä sekä erillisenä tavaralajina että normaalin kuitupuun seassa. Tulokset olivat siinä määrin rohkaisevia, että koesarjaa jatkettiin joulukuussa 1994. Tämän koesarjan tuloksia selostetaan luvussa 6.2.3.

6.2.2 Metsä-Serlan rumpukuorintakoe maaliskuussa 1994

Metsä-Serlan Äänekosken sulfaattimassatehtaan rumpukuorimo on valmistunut vuonna 1984. Kone Oy:n toimittaman rummun pituus on 26 m ja läpimitta 5,5 m. Kuoriaukkojen nimellisveys on 45 mm, mutta koetilanteessa aukot olivat kulumisen seurauksena laajentuneet.

Maaliskuussa 1994 tehdyssä kokeessa tutkittiin karsimattoman ensiharvennuspuun erillisen karsinta-kuorintakäsittelyn mahdollisuuksia. Lähtökohtana oli metsurihakkuuseen perustuva korjuujärjestelmä, jossa miestyötä helpotetaan ja energiapuun kertymää kasvatetaan ensiharvennuspuun karsintavaatimuksia höllentämällä.

Kaikki puutavara oli peräisin ensiharvennusmänniköistä. Männyn joukossa oli kuitenkin 6% kuusta. Hakkuuohjeitten mukaan metsurin oli tullut katkoa puut noin 5 m:n pituuteen ja 6 cm:n latvaläpimitaan. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 12,5 cm:n puut oli jätetty karsimatta, mutta järeämmät puut oli karsittu moottorisahalla tavaralajimenetelmän mukaisesti. Kysymyksessä oli itse asiassa tavaralajimenetelmän ja osapuumenetelmän yhdistelmä, jota joskus kutsutaan osa-ainespuumenetelmäksi.

Kokeen tulokset

Kokeen aikana tuotettiin 89 m³ tuoretta haketta tunnissa, joten rumpu toimi perin vajaalla kapasiteetilla. Sen täyttöaste oli vain 20 %. Syy kehnoon tuotokseen oli osaksi itse raaka-aineessa mutta osaksi myös raaka-aineen autokuljetusongelmista, jotka aiheuttivat katkoksia sisäänsyötössä ja estivät rummun käytön täydellä kapasiteetilla. Selvittämättä jäi, mikä oli kummankin tekijän osuus kuorinnan hitauteen. Esikokeessa oli parhaimmillaan päästy tähän nähden kaksinkertaiseen tuntituotokseen, jolloin viimeistään prosessitähteen runsaus alkoi tuottaa ongelmia. Koe ei siis anna selkeätä vastausta kysymykseen rummun tuottavuuden alenemisesta, kun ensiharvennusmänty käsitellään osaksi karsimattomana, mutta kapasiteetin supistuminen on joka tapauksessa varsin merkittävä.

Osapuun runkopuupitoisuudeksi mitattiin rumpuun syötettäessä 83,4%. Rummusta ulos tulleen kaiken biomassan runkopuupitoisuudeksi mitattiin vastaavasti 82,6%. Toisistaan riippumattomat mittaustulokset ovat tyydyttävän lähellä toisiaan.

Lopputuotteesta 81,9% oli selluhaketta ja 18,1 % prosessitähdettä. Potentiaalisesta kuitupuusta 2,0% joutui hävikkinä prosessitähteeseen ja sen mukana energiakäyttöön.

Hakkeen kuoripitoisuus oli 1,1 %. Heikohko tulos aiheutunee osaksi rummun alhaisesta täyttöasteesta, sillä kuorintateho heikkenee vajaakapasiteetilla. Esikokeessa, jolloin täyttöaste oli korkeampi, päästiin alle 1 %:n kuoripitoisuuteen.

Rakoseulalle jääneen ylipaksun 8 mm:n jakeen osuus oli suuri. Se oli normaalikuitupuun vertailuaineistossakin 15,1 % mutta ensiharvennuspuulla nyt peräti 21,8 % (taulukko 18). Syynä näin korkeisiin osuuksiin lienevät hakkuri ja puun jäätyneisyys. Tulokseen on saattanut vaikuttaa puun oksikkuuskin. Ylipaksussa seulontajakeessa oli runsaasti rungon sisäisestä oksa- ja oksanympäryspuusta lohkeilleita palasia.

Taulukko 18. Hakkeen kuoripitoisuus ja palakokojakauma Metsä-Serlan rumpu kuorintakokeessa maaliskuussa 1994.

Hakejaje	Normaali kuitupuu Hakkeen kokojakauma, %	Ensiharvennus männyn osapuu	Ensiharvennus- männyn osapuu Hakkeessa kuorta, %
Ylipitkä	1,4	2,2	1,2
Ylipaksu	15,1	21,8	0,8
Hyväksytty	76,7	67,7	1,1
Neulahake	5,4	6,5	2,8
Puru	1,5	1,8	..
Kaikki	100,0	100,0	1,1

Kokeen tulos ei ollut tyydyttävä. Rummutuksen tuottavuus oli keho, mutta jäi selvittämättä, missä määrin tämä oli seurausta puutavaran joukossa olleista oksista ja missä määrin puutavarasta riippumattomista tekijöistä. Runkopuun hävikki oli hyväksyttävällä tasolla, mutta hakkeen kuoripitoisuus oli korkea ja palakokojakauma epäedullinen. Energiapuuta kertyi kuitenkin enemmän kuin normaalisti karsitusta kuitupuusta.

6.2.3 Enocellin rumpukuorintakoe joulukuussa 1994

Luvussa 6.2.1 on kuvattu Enocell Oy:n Uimaharjun sulfaattiselutehtaalla loka-kuussa 1993 toteutettu koe, jossa tutkittiin ensiharvennusmännyn kuoriutumista erilliskäsittelyssä omana tavaralajinaan sekä sekakäsittelyssä päätehakkualan mäntykuitupuun joukossa. Kuorimon tekniikka on kuvattu samassa yhteydessä.

Joulukuussa 1994 toteutettiin uusi koe. Seurannan kohteena oli erityisesti vähimmäisläpimitan vaikutus kuorintatulokseen.

Kokeen tulokset

Hävikki oli odotusten mukaisesti pienin, 1,0 %, päätehakkuun kuitupuulla, jonka läpimittavaatimus oli 7 cm. Ensiharvennuspuulla hävikki kohosi suurimmilleen 5 cm:n latvaläpimittaan tehdyssä joukkokarsitussa puussa. Syynä ei liene pelkästään pieni latvaläpimitta vaan myös joukkokäsittelyssä oksakiehkuroitten kohdalle syntyvät pölkyn sisäiset murtumat. Hakkeen kuoripitoisuus oli joukkokäsittelyssä erässä kaikkein alhaisin, joten sen kuorintakin on saattanut olla turhan perusteellinen. Lisäksi tämä puuerä oli peräisin muita viljavammalta kasvupaikalta ja nuorempaa, minkä vuoksi puutavaran lujuuskin on saattanut olla heikompi. Tulos joukkokarsitun puun suuremmasta kuorintahävikistä on kuitenkin yhdenmukainen aikaisempien ruotsalaisien tulosten (Jonsson 1989) sekä Uimaharjun ensimmäisen koesarjan kanssa. Niissä joukkokarsitun ensiharvennusmännyn runkopuun hävikki oli 4,2 % ja 3,0 %, tässä jälkimmäisessä Uimaharjun kokeessa 4,2 %.

Taulukko 19. Runkopuun hävikki ja hakkeen kuoripitoisuus Enocell Oy:n rumpukuorintakokeessa joulukuussa 1994.

Leimikkotyyppi	Karsintatapa	Läpimitta- vaatimus, cm	Runkopuun hävikki, %	Hakkeessa kuorta, %	Energia- jakeen osuus, %
Päätihakkuu	Yksinpuin	7	1,00	0,17	6,6
Ensiharvennus	Yksinpuin	7	1,39	0,35	9,5
Ensiharvennus	Yksinpuin	5	1,96	0,24	8,9
Ensiharvennus	Joukkona	5	4,18	0,14	13,0
Ensiharvennus	Yksinpuin	9	1,08	0,34	8,6
Ensiharvennus	Yksinpuin	5	2,44	0,27	9,6

Hakkeeseen jäi kuorta 0,1-0,4 %. Koska ensiharvennuspuun kuoripitoisuus oli rummutuksen alkaessa vain 8 % ja kuorintahävikki alhainen, prosessitähteen määrä jäi alle 10 %:n. Poikkeus oli joukkokarsittu ensiharvennuspuu, josta prosessitähdetä kertyi oksien ja suuremman puunhävikin vuoksi 13 %.

Hakkeen palakokojakauma oli jälleen edullinen. Hyväksytyin jakeen osuus oli päätihakkuun kuitupuulla 90 % ja ensiharvennuspuulla 77-89 %. Palakokojakauma heikkeni eräkohtaisesti samalla kun pölkyn vähimmäisläpimitta aleni ja kuorintahävikki kasvoi. Muita heikompi palakokojakauma syntyi joukkokarsitusta puusta, jossa sekä ylitteen että alitteen osuus oli korkea (taulukko 20). Syynä olivat rummutuksessa syntyneet murtumapinnat, jotka paitsi kasvattavat hävikkä myös huonontavat palakokojakaumaa.

Taulukko 20. Hakkeen palakokojakauma Enocell Oy:n rumpukuorintakokeessa joulukuussa 1994.

Leimikko- tyyppi	Karsintatapa	Läpimitta- vaatimus, cm	Yli- pitkä	Yli- paksu	Hyväk- sytty	Neula- hake	Puru
Osuus kuivamassasta, %							
Päätihakkuu	Yksinpuin	7	0,3	4,0	90,5	4,1	1,1
Ensiharvennus	Yksinpuin	7	0,7	6,0	85,9	5,7	1,7
Ensiharvennus	Yksinpuin	5	0,6	5,8	86,8	5,3	1,5
Ensiharvennus	Joukkona	5	1,3	10,4	78,8	7,2	2,3
Ensiharvennus	Yksinpuin	9	0,3	5,1	88,1	5,1	1,4
Ensiharvennus	Yksinpuin	5	1,4	8,0	83,0	6,1	1,5

Paras tulos sekä runkopuun hävikin, hakkeen kuoripitoisuuden että hakkeen palakokojakauman suhteen saavutettiin päätehakkuualan kuitupuulla, mutta ensiharvennuskarsinnan tulokset olivat positiivisia ja sopusoinnussa Uimaharjun ensimmäisen koesarjan kanssa. Ensiharvennuspuiden pienempi läpimitta ei supistanut rummuksen tuottavuutta, eikä hävikki noussut korkeaksi silloinkaan, kun kuitupuuta oli tehty 5 cm:n latvaläpimittaan. Hakkeen laatu oli hyvä sekä kuoripitoisuuden että palakoon suhteen. Tulos oli muita eriä heikompi joukkokarsitulla ensiharvennuspuidella, mikä tosin osaksi on saattanut aiheutua leimikko- ja prosessisäätötekijöistä.

6.3 Ketjukarsinta-kuorinta

Rumpukuorimot on suunniteltu ja mitoitettu karsitulle puutavaralle. Jos puutavara jätetään karsimatta ja vähimmäisläpimittaa samalla alennetaan, vakiorakenteisten kuorimarumpujen käyttö ei ole enää aivan mutkatonta. Kun rumpu ei ainoastaan kuori vaan myös karsii, tähteen määrä pyrkii ylittämään kuoriaukkojen läpäisykyvyn, eikä rummun täyttä kapasiteettia voida käyttää hyväksi. Ongelma ei ratkea aukkoja suurentamalla, sillä silloin kasvaa runkopuun hävikki, joka karsimattomalla osapuulla muutoinkin on suurempi.

Jottei karsimaton puu rasittaisi kuorimon kapasiteetti liiaksi, eräillä ruotsalaisilla ja suomalaisilla sulfaattimassatehtailta osapuuta on rummutettu normaalin kuitupuun joukossa. Sekarummutus kuitenkin lisää ohuitten pölkkyjen murtumia ja kasvattaa hävikkiä. Osapuun seososuus joudutaan pitämään alle 10-15 %:n.

Uuden vaihtoehdon karsinnan ja kuorinnan yhdistämiseen tarjoaa Yhdysvalloissa 1980-luvun lopulla kehitetty ketjukarsinta-kuorintatekniikka, jossa karsimattomat puut syötetään piiskaavilla teräsketjuilla varustetun pyörivän rumpuparin välistä. Karsija-kuorijaan liittyy usein kiinteästi myös laikkahakkuri, jolloin tuotteina ovat valmis selluhake sekä oksien, kuoren ja hukkarunkopuun muodostama prosessitähde. Menetelmä ei ole yleistynyt Eurooppaan, missä rajoitteina ovat ennen kaikkea järeän amerikkalaisen kaluston soveltumattomuus pienille työmaille ja pienikokoiselle puulle.

Ketjukarsinta-kuorinnan tekniikka

Pertti Szepaniak Oy toi vuonna 1991 maahan Peterson Pacific DDC 5000 ketjukarsija-kuorija-hakettajan ja muunsi sen suomalaiseen puunhankintajärjestelmään soveltuvaksi. Yksikkö on tarkoitettu sekä metsävarastolla, puutavaraterminalissa että tehdasvarastolla toimimaan, ja siksi se on asennettu telialustaiselle puoliperävaunulle, jota siirretään kuorma-autolla. Se on varustettu omalla ohjaimella, 515 kW:n dieselmoottorilla, valmistajan omalla karsinta-kuorintalaitteella, laikkahakurilla ja nivelpuomikuormaimella.



Kuva 18. Peterson Pacific DDC 5000 ketjukarsija-kuorija-hakettaja Suomen oloihin muunnettuna.

Ketjukarsinta-kuorintalaite sijaitsee yksikön perässä ohjaamon alapuolella. Taakka saatetaan kuormaimella ylä- ja alasyöttörullien väliin, mistä se kulkeutuu 58 x 122 cm:n syöttöaukon läpi kahden vaakasuuntaisen rummun teräsketjujen piiskahtavaksi. Syöttönopeus on 38 m/min ja piiskaavien rumpujen nopeus 525-625 rpm. Tähdettä siirretään rumpujen alapuolelta koneen sivulle hydraulisynterin työntämällä kolalla. Koneen sivulta tähdettä on aika ajoin poistettava pyöräkuormaajalla.

Piiskauskäsittelyn jälkeen rangat jatkavat syöttörullien ajamina kolmiteräiseen laikkahakkuriin, jonka nopeus on 600 rpm. Laikan yhteydessä on erottelija, joka estää piiskauksessa syntyviä irrallisia palasia ohittamasta laikkaa ja siten pääsemästä selluhakkeen joukkoon. Näin erottuva separaattorijäte purkautuu hakkurin sivulle omaan kasaansa. Selluhake ohjataan haketorvesta varastokasalle tai suoraan autoon.

Yksikkö on alunperin suunniteltu ensiharvennusmäntyä järeämmille kokopuille. Katkaistun osapuun käsittelemiseksi siihen on Suomessa lisätty viisimetrisille puunosille mitoitettu syöttöpöytä. Teleskooppimainen hakeputki on muutettu täysperävaunukalustoa silmällä pitäen yläpuolelta purkavaksi (kuva 18). Näin varustettuna yksikön kokonaisuudessa on vetoauto mukaan luettuna 52 t.

Menetelmän teknistä, taloudellista, organisatorista ja ekologista soveltuvuutta ensiharvennusmänniköitten korjuuratkaisuksi on arvioitu Metsätehon (Kuitto & Rieppo 1993, Rieppo ym. 1995) ja Metsäntutkimuslaitoksen (Hakkila & Kalaja 1993)

yhteistyönä. Tutkimus koostuu useista kenttäkokeista ja mittauksista, joista monet ovat jo menettäneet ajankohtaisuutensa kaluston ja menetelmän kehittymisen myötä. Seuraavassa kuvataan lyhyesti Metsäntutkimuslaitoksen osatutkimusten tärkeimpiä tuloksia, joita on julkaistu aikaisemmin Metsäntutkimuslaitoksen Folia Forestalia-sarjassa ja Joensuun yliopiston monisteena (Niemeläinen 1992).

Karsinta-kuorinta-haketustyön tuottavuus

Kuljettajan tehollinen työaika kuluu lähes kokonaisuudessaan kuormaimen käsittelyyn. Varsinaisen tehotyön tuottavuus riippuu siis kuljettajan kokemuksesta ja taidosta käsitellä karsimatonta osapuuta, kuormaimen nopeudesta ja liikeradoista, varastopinojen laadusta ja sijoittelusta koneen syöttöpöytään nähden sekä puutavaran pituudesta, oksaisuudesta, jäätyneisyydestä ja muista taakan muodostumiseen ja käsittelyyn vaikuttavista tekijöistä.

Yksikön koko ja kapasiteetti ovat liian suuria Suomen yksityismetsälöitten pienille leimikkokertymille ja ahtaille varastopaikoille. Perävaunullisen kuorma-auton sijoittaminen karsinta-kuorinta-hakettajan rinnalle vaatii runsaasti tilaa, ja kuorma-autojen odotteluun kuluu aikaa. Koneen ympärille kasaantuvan prosessitähteen siirtelyyn tarvitaan pyöräkuormaaja, ja tähteen talteenotto epätasaisesta ja kivisestä maastosta on hidasta ja tehotonta. Taloudellisesti edullisin, mielekäs ja varmin vaihtoehto on niin ollen toiminta terminaalilla, tehdasvarastolla tai lämpölaitoksen yhteydessä. Enso-Gutzeit Oy:n Vuoksenlaakson puutavaraterminaalissa kolmen eri kuljettajan tehoajan tuottavuus oli seuraava:

Kuljettaja	Syöttötaakan koko, m ³	Tuottavuus selluhaketta tehotunnissa	
		Tilavuus, m ³	Kuivamassa, t
1	0,30	49,9	18,5
2	0,30	45,0	16,7
3	0,19	27,3	10,1

Tulokset ovat sopusoinnussa Metsätehon laajempien tuotostutkimusten kanssa (Rieppo ym. 1995). Niitten mukaan ketjukarsija-kuorija-hakettajan keskimääräinen tuottavuus on käyttötuntia kohti seuraava:

	Tienvarsivarastolla Tuottavuus, selluhaketta m ³ /käyttötunti	Tehdasvarastolla
Karsimaton mäntyosapuu	32-39	37-43
Joukkokarsittu mäntypuu	34-45	43-51

Tuottavuus vaihtelee olosuhteista, puutavarasta, työn organisoinnista ja koneen kuljettajasta riippuen. Metsätehon tutkimuksen mukaan mm. seuraavat tekijät vaikuttavat lopputulokseen:

- Tehoajan menekki on tehdasvarastolla 15 % pienempi kuin tienvarsivarastolla
- Tehoajan menekki on karsitulla puulla 20 % pienempi kuin karsimattomalla
- Tehoajan menekki kasvaa 10-20 %, kun ensiharvennuskäntä on selvästi keskimääräistä ohuempaa.
- Pakkassäällä -17—-27°C lämpötilassa tuottavuus supistuu kolmanneksen, kun varastopinot ovat jäässä.
- Tehoajan menekki kasvaa, kun osapuun seassa on karsimatonta kuusipuuta.

Keskitetyllä käsittelyllä lienee saavutettavissa ainakin 80 %:n toiminnallinen käyttöaste, jolloin yksikön tuottavuus on 35-40 m³ selluhaketta tunnissa. Mainittakoon, että vuoden 1994 loppuun mennessä Pertti Szepaniak Oy:n Suomen oloihin mukauttama Peterson Pacific DDC 5000 yksikkö oli runsaan 3 vuoden aikana työskennellyt metsä- ja tehdasvarastolla kaikkiaan 7000 tuntia ja tuottanut haketta kesä- ja talviolosuhteissa yhteensä 235 000 m³ eli keskimäärin 34 m³ käyttötunnissa.

Kun toimitaan tehdasvarastolla tai terminaalilla, osapuu on kuljetettava paikalle kuorma-autolla. Osapuun kuljetuskustannukset ovat korkeammat kuin karsitun kuitupuun, mikä rasittaa keskitetyn käsittelyn kannattavuutta. Prosessitähteen hyödyntämisen kannalta on tärkeätä, että varastokenttä on päällystetty, routaan-tunut tai muutoin sellainen, ettei tähteeseen sekoitu tarpeettomasti epäpuhtauksia.

Runkopuun hävikki ja energiapuun kertymä

Prosessitähteen määrä ja koostumus riippuvat raaka-aineen järeydestä ja oksaisuudesta. Tämän tutkimuksen osapuuraaka-aine oli 4,5 m:n ohjepituuteen katkotua ensiharvennuskäntyä, josta oli jätetty metsään läpimitaltaan alle 7 cm:n latva.

Kun ohuista osapuupölkyistä koostuva taakka siirretään pinosta syöttöpöydälle, se leviää ja siitä putoaa irto-oksia ja kuoriainesta pöydän ympäristöön. Tämä *syöttötähde* koostuu lähinnä kuivista oksista. Syöttötähteen osuus oli 3,2 % käsitellystä biomassasta.

Varsinainen *piiskaustähde* koostuu pääasiassa oksa- ja kuorimurskeesta, mutta myös rungosta lohjenneista säleistä ja murtuneista pätkistä. Nämä runkopuun kappaleet ovat liian suuria lämpölaitosten syöttöjärjestelmiin. Piiskaustähteeksi joutui kaikkiaan 15,9 % biomassasta. Sen runkopuupitoisuus oli 3,2 %.

Piiskauksessa karsiutuneet ja kuoriutuneet rangat etenevät laikkahakkuriin. Laikan suojakaulus erottelee piiskauksesta kulkeutuneet irtopalaset *separaattoritähteeksi*, jonka osuus oli 3,6 % käsitellystä biomassasta. Sen runkopuupitoisuus oli 79,9 % koostuen suikalemaisista tikuista, joita ketjut rouhivat pölkyn vaippapinnalta.

Selluhakkeen osuus oli ennen seulontaa kaikkiaan 77,3 % syötteen biomassasta. Loput 22,7 % ohjautui siis prosessitähteenä energiapuuksi, jonka osuus kasvaa osapuun läpimitan alentuessa.

Taulukko 21. Runkopuun hävikki ensiharvennusmännyn kesäaikaisessa ketjukar-sinta-kuorinta-haketusprosessissa. Osapuuraaka-aineen vähimmäisläpimitta 7 cm.

Biomassan komponentti	Osuus syötteen biomassasta	Runkopuu-pitoisuus %	Osuus syötteen runkopuusta
Syöttötähde	3,2	0,0	0,0
Piiskaustähde	15,9	3,2	0,5
Separattoritähde	3,6	79,9	2,8
Energiapuu yhteensä	22,7	14,5	3,3
Selluhake	77,3	97,8	96,7
Kaikki	100,0	79,0	100,0

Runkopuun hävikkiin vaikuttavat puulaji, puun koko, pölkyn pituus, latvaläpimita, lämpötila sekä piiskauskäsittelyn voimakkuus ja kesto. Hävikki oli kesäaikaisessa seurannassa keskimäärin 3,3 %, josta pääosa kerääntyi separattoritähteesseen (taulukko 21).

Hakkeen kuoripitoisuus

Kuoriutuminen riippuu raaka-aineen ominaisuuksista, sääoloista ja vuodenajasta, piiskaketjujen määrästä ja kunnosta, syöttötaakan koosta sekä prosessisäädöistä. Tulokseen vaikuttavat erityisesti seuraavat tekijät:

- *Puulajien välillä* on suuria eroja. Männyllä päästään parempaan tulokseen kuin kuusella ja koivulla.
- *Pienissä puissa* on suhteellisesti enemmän kuorta ja vaippapintaa kuin suurissa, ja ne käsitellään useamman pölkyn taakoissa. Siksi pieniin puihin pyrkii jäämään enemmän kuorta. Rinnankorkeusläpimitaltaan alle 5-6 cm:n puut eivät sovellu piiskakäsittelyyn.
- Pölkyn *pitäuden pienentyessä* kuorintatulos kärsii, sillä varsinkin taakan ohuemmat pölkyt ajautuvat rumpujen läpi aluksi liian nopeasti ja hidastavat kulkuaan vasta hakkuriin törmättyään.
- Suuressa *syöttötaakassa* puut suojaavat toisiaan ja vaimentavat piiskauksen tehoa. Taakan koon ei tulisi ylittää 0,3 m³.
- Hidas *syöttönopeus* merkitsee pitkää viipymää ja saa ketjut myötäilemään rungon pintaa, jolloin kuorintatulos kohentuu.
- *Rumpujen kierrosnopeuden* kasvaessa kuorintatehokin kasvaa, mutta samalla myös ketjujen kuluminen ja murtuminen nopeutuvat ja puun hävikki lisääntyy. Ketjujen katkeillessa ja lyhentyessä ne menettävät piiskaustehoaan.
- *Puunjäätyessä* kuori kiinnittyy lujasti puuaineeseen. Kuorintavastus kasvaa ja tulos heikentyy.
- *Puunkuivuessa* kuorintavastus kasvaa niinkään. Siksi puutavara tulee käsitellä mahdollisimman tuoreena.

Kesäaikana mäntyosapuun kuoripitoisuudeksi jää 1-2 %. Osa jäljelle jääneestä kuoresta murenee haketuksessa, minkä seurauksena kuorta kasaantuu hakkeen puru- ja neulajakeisiin. Jos hienoaines poistetaan seulomalla, hakkeen keskimääräinen kuoripitoisuus alenee hieman. Seuraava esimerkki kesäajalta osoittaa, että kuoripitoisuus on korkein neula- ja etenkin purujakeessa:

Seulontajae		Kuoripitoisuus, %
Ylipitkä		0,10
Ylipaksu		0,97
Hyväksytty	13-45 mm	0,83
Hyväksytty	7-13 mm	1,82
Neulahake		2,42
Puru		12,77
Kaikki hake		1,15
Hyväksytty hake		1,07

Piiskauskäsittelyä voidaan soveltaa myös karsitun puun kuorintaan, jolloin tulos paranee. Menettelyä on pidettävä kuitenkin poikkeuksellisena, sillä ketjukarsinta-kuorintateknikka on kilpailukykyinen nimenomaan silloin, kun halutaan käsitellä karsimatonta puuta. Seuraavat tulokset ovat Enocell Oy:n tehdasvarastolla tehdystä kokeesta, jossa vertailtiin kolmella eri tavalla korjattua ensiharvennuskäntyä. Miksi joukkokarsittu puu kuoriutui paremmin kuin yksin puin karsittu, jäi selittämättä.

Raaka-aine	Piiskauskäsittelyn kuorintatulos	
	Kaikki hake	Hyväksytty hake
	Kuoren osuus kuivamassasta, %	
Harvesterilla yksin puin karsittu	1,9	1,7
Harvesterilla joukkona karsittu	1,1	0,9
Karsimatonta osapuu	2,6	2,4

Ongelmalliseksi on osoittautunut talviaikainen ketjukarsinta. Jäätyneen puun kuoriutumista seurattiin ensimmäisen kerran helmi-maaliskuussa 1992. Kun lämpötila pysytteli välillä +3°C ja -13°C, hakkeen kuoripitoisuus oli keskimäärin 3,3 %, ja lämpötilassa -18°C kuoripitoisuus jäi 4,4 %:iin. Ketjuissa tehdyistä muutoksista huolimatta myöhemmätkään kokeet eivät ole johtaneet jäätyneellä puulla tyydyttävään tulokseen. Talvikaudella 1993-1994 Kemissä tehdyssä tutkimuksessa lämpötila oli kokeen aikana -2 — -22°C, ja selluhakkeen kuoripitoisuudeksi jäi keskimäärin 3,2 %. Äänekoskella tehdyssä tutkimuksessa lämpötila oli -2 — -30°C, ja kuoripitoisuudeksi jäi vastaavasti 3,5 %.

Kone- ja menetelmäkehittäminen kuorintatuloksen parantamiseksi jatkuu. Eräs vaihtoehto on ylimääräisen rumpuparin lisääminen piiskauslaitteistoon, mistä Pohjois-Amerikassa on saatu myönteisiä kokemuksia. VTT Energia tutkii piiskauskäsittelyn täydentämistä teräsharjojen avulla.

Hakkeen palakokojakauma

Palakoon seurantatutkimuksessa valmistettiin helmi-maaliskuussa 1992 yhteensä 3600 m³ (8930 i-m³) haketta neljällä teräsarjalla. Laikkahakkurin terät oli säädetty ääriasentoonsa 25 mm:n nimellispituudelle. Hyväksytyin palakoon osuus oli keskimäärin 80 %. Suojasäällä osuus oli 82 % mutta lämpötilassa -18°C vain 75 %, sillä jäätyessään puu haurastuu, jolloin hienohakkeen määrä kasvaa. Ylisuurta ja ylipaksua haketta oli vain 3,8 % mutta alamittaista *neulahaketta ja purua yhteensä* 16,6 %, mikä tulos on yhdenmukainen Peterson Pacific DDC 5000 karsiija-kuorija-hakettajasta Kanadassa julkaistujen havaintojen kanssa (Favreau 1992).

Vaikka teräsarjaa kohti valmistettiin yli 800 m³ (2000 i-m³) haketta, *terien kunnon* ei havaittu vaikuttavan palakokojakaumaan. Mutta esimerkiksi Kanadassa on todettu terien tylstymisen johtavan aliteosuuden kasvuun niin nopeasti, että terien vaihtoa suositellaan 10 autokuorman välein (Perrier 1990). Kanadassa näet puut tuodaan metsästä laahustaakkoina, jolloin niihin kertyy epäpuhtauksia enemmän kuin suomalaisessa korjuujärjestelmässä.

Vaatimusten vastaisia paloja syntyy eniten pienistä rungoista. Rinnankorkeuslämpimitaltaan alamittaisten 5-6 cm:n runkojen ongelmat eivät rajoitu yksinomaan korkeisiin korjuukustannuksiin, suureen hävikkiin ja kehnoon kuorintatulokseen, vaan haittana on lisäksi hakkeen epäedullinen palakokojakauma:

Rungon D _{1,3} , cm	Hakkeesta palakooltaan hyväksyttävää, %
4-5	73
6-10	78
11-15	80
16-20	81

Peterson-Pacific DDC 5000 ketjukarsinta-kuorinta-hakettajan tuottamassa selluhakkeessa on siis runsaasti alamittaisia paloja. *Epäedullista palakokojakaumaa ei kuitenkaan tule tulkita pelkästään menetelmän yleiseksi rakenteelliseksi heikkoudeksi*. Ensisijaisesti on kysymys Precision laikkahakkurin ominaisuuksista ja terien riittämättömästä säätövarasta. Vähäisemmässä määrin alitteen suureen osuuteen vaikuttavat myös piiskauksessa puun vaippapinnalle syntyvät rikkoumat ja nukka.

Prosessitähde polttoaineena

Osapuuraaka-aineen latvaläpimitasta riippuen 20-30 % syöttestä jää prosessitähdeksi. Se koostuu syöttötähdestä, piiskaustähdestä sekä separaattoritähdestä. Se on pitkälle murskaantunutta, mutta joukossa on kuitenkin lämpölaitosten syöttölaitteitten kannalta liian suuria kappaleita. Käsittelemättömän tähteen palakokojakauma oli seuraava:

Seulontajae, mm	-3	3-7	7-45	45-150	150+
Osuus kuivamassasta, %	7,8	12,3	63,3	4,7	11,9

Häiriötön syöttö lämpölaitoksella edellyttää, että prosessitähde tai ainakin siitä kiekkoselalla erotettu järein osa murskataan. Murskausta tutkittiin Pertti Szepaniak Oy:n Morbark 1200 vasaramurskaimella, jonka ylähalkaisijaltaan 360 cm:n syöttösuppilo täytetään päältä laitteen omalla nivelpuomikuormaimella tai erillisellä pyöräkuormajalla. Suppilon pohjalla pyörii läpimitaltaan 40 cm:n roottori, jossa on yhteensä 32 vasaraa 4 riviin sijoitettuina. Vasarat pakottavat murskattavan biomassan pohjaseulan läpi hihnakuuljettimelle. Pohjaseulat ovat vaihdettavia, ja niitä on kolmea karkeusastetta: 5x5 cm, 7x7 cm sekä 8x13 cm.

Murskauskokeet tehtiin kesäkaudella 1994 Uimaharjulla, Tainionkoskella ja Joensuussa. Kahdessa ensinmainitussa kokeessa tähde oli tuoretta, Joensuussa sen sijaan 10 viikkoa vanhaa ja pinnalta jo kuivahtanutta. Murskauksen tuotos oli Uimaharjussa 20,4 t ja Joensuussa 15,2 t kuivamassaa tehotuntia kohti hiekan osuus pois vähennettynä. Tulokset on julkaistu Joensuun yliopiston raporttina (Pulkkinen & Asikainen 1994).

Kummassakin paikassa työskenneltiin päällystämättömällä kentällä, ja syöttö tapahtui pyöräkuormajalla. Murskeen mukaan joutui myös hiekkaa. Uimaharjun kokeessa murskeen tuhkapitoisuus oli 8,6 % ja Joensuun kokeessa peräti 18,9 %. Sen sijaan Tainionkosken asfalttikentällä tuotetun murskeen tuhkapitoisuus oli vain 1,4 %, mikä vastaa puhdasta prosessitähdettä. Kentän tulisi siis olla päällystetty.

Murskeen palakokojakauma riippuu biomassan koostumuksesta ja kosteudesta sekä toisaalta vasaraterien kunnosta ja seula-aukkojen koosta. Hienoin seula estää varmimmin ylisuurten kappaleitten pääsyn murskeeseen, mutta samalla se hidastaa biomassan kulkua ja alentaa tuottavuutta (taulukko 22).

Talvella tuotetusta tähteestä tehdyn murskeen kosteus saattaa kohota polton kannalta liian korkeaksi, jos tähteen joukkoon jää paljon lunta ja jäätä. Tästä on esimerkkinä Uimaharjun murskauskoe. Laadun valvonta onnistuu parhaiten suurilla varastoilla.

Taulukko 22. Ylisuuren jakeen osuus Morbark 1200 vasaramurskaimella käsitellyssä ketjukarsija-kuorija-hakettajan prosessitähdeessä seulan koosta riippuen.

Koepaikka	Seulakoko, cm	Murskeen kosteus, %	Yli 45 mm:n mursketta, %	Yli 150 mm:n mursketta, %
Uimaharju	8x13	66,2	1,0	0,8
Tainionkoski	8x13	46,3	5,3	3,2
Tainionkoski	7x7	46,3	1,4	0,2
Joensuu	7x7	40,0	0,9	0,6
Tainionkoski	5x5	46,3	0,1	0,0

6.4 Yhdistetty ketjukarsinta-kuorinta ja rumpukuorinta

Luvussa 6.2 on osoitettu, että rumpukuorinta soveltuu parhaimmillaan myös pienikokoiselle ensiharvennusmännylle. Runkopuun hävikki voidaan pitää kurissa, hakkeen kuoripitoisuus saadaan alhaiseksi ja karsitulla puulla myös rummun tuottavuus säilyy korkeana. Kuitenkin vain osa käytössä olevista rumpukuorimoista on tässä suhteessa tyydyttäviä. Jos ensiharvennuspuu on karsimatonta osapuuta, rumpukuorintaan liittyy aina ongelmia, ja erityisesti tuottavuus kärsii. Ketjukarsinta-kuorinta taas soveltuu karsimattomalle puulle, mutta ongelmana on tavoitellun kuoripitoisuuden saavuttaminen (luku 6.3).

Perti Szepaniak Oy kehittää pieniläpimittaisen kuitupuun karsintaan ja kuorintaan uutta menetelmää, jossa *sovelletaan peräkkäin sekä piiskaus- että kuivarummutekniikkaa*. Piiskausvaiheessa puu karsiutuu ja menettää suuren osan kuorestaan. Piiskausta seuraa yhdensuuntaisrummutus, jolla kuorinta viimeistellään. Kun kuori on rikottu ensin piiskaamalla ja siihen on saatu murtumia ja avonaisia reunakohtia, rummutus nopeutuu oleellisesti. Runkopuun hävikki pidetään kurissa säätämällä kumpikin käsittely tavanomaista hellävaraisemmaksi. Kevennetty piiskaus vähentää myös ketjujen kulutusta, joka muutoin on huomattava kustannuserä ketjukarsinta-kuorinnassa.



Kuva 19. Perti Szepaniak Oy:n yhdistelmäkuorimon ensimmäinen prototyyppilaitos. Etualalla piiskakarsija, taka-alalla kuivarumpu.

Prototyypilaitos on kiinteä. Kokonaispituus on 18,7 m koostuen 2,2 m:n syöttöpöydästä, 3,3 m:n ketjukarsija-kuorijasta, sen ja rummun väliin jäävästä 3,2 m:n kuljettimesta sekä 10,0 m:n kuivarummusta (kuvat 19 ja 20).

Ketjukarsija-kuorijassa on piiskausta varten kaikkiaan 144 ketjua, jotka ovat ylärummulla 13- ja alarummulla 9-lenkkisiä. Piiskausrumpujen nopeus on vain 350 rpm.

Kuorimarummun sisäläpimitta on 210 cm. Kuoriaukkojen leveys on 40-43 mm. Sisäpinnalla on puitten hankausliikkeen tehostamiseksi 194 mm:n ulokkeita. Purkuaukon alareunalla on puitten viivyttämiseksi portti, jonka korkeus oli ensimmäisten kokeitten aikana kiinteä. Myöhemmin portti tullaan varustamaan sulkumekanismilla, jotta puutavaran viipymää voidaan säädellä. Kokeitten aikana rummun pyörimisnopeus oli 4,8-5,5 rpm ja kaltevuus 0,5 %.

Ensimmäiset kokeet tehtiin marraskuussa 1994 Pertti Szepaniak Oy:n, Enso-Gutzeit Oy:n, Metsätehon ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteistyönä, jossa Metsäntutkimuslaitos vastasi raaka-aineselvityksistä. Laitoksen prototyypiluonteen vuoksi tutkimuksen kohteena olivat lähinnä vain kuorintahävikki, syötteen jakautuminen selluhakkeeksi ja prosessitähdeksi sekä hakkeen kuoripitoisuus prosessin jälkeen. Tuottavuus selvitetään Metsätehon toimesta vasta sitten, kun puutavaran vastaanotto ja syöttö on järjestetty jatkuvan toiminnan edellyttämään kuntoon.



Kuva 20. Yhdistelmäkuorimon kuivarumpu lähikuvassa. Etualalla kuoriaukkojen läpi pudonnutta prosessitähdettä.

Kokeen tulokset

Runkopuun hävikkiä tapahtuu pääasiassa piiskauksessa. Erillisinä toteutettaviin ketjukarsinta-kuorintaan ja rumpukuorintaan verrattuna kumpikaan käsittely ei ole yhtä rajua, ja siksi hävikki pysyy kohtuullisena. Hävikki oli tässäkin kokeessa karsimattomalla puulla suurempi kuin karsitulla:

Erä	Karsinta-aste	Piiskaus	Rummutus	Yhteensä	Kuitupuussa
		Runkopuun hävikki, %			kuorta, %
1	Karsittu	1,03	0,14	1,17	1,52
2	Karsittu	1,51	0,26	1,77	0,34
3	Karsimaton	3,23	0,25	3,48	0,41

Ensimmäisessä käsittelyerässä puun hävikki oli pieni, mutta hakkeen kuoripitoisuus jäi liian korkeaksi. Kahdessa seuraavassa kokeessa päästiin selvästi alle vaaditun kuoripitoisuusrajan, mutta samalla kuorintahävikki kasvoi. Erityisesti karsimattoman puun kuorintatulokset olivat hyvät, vaikka lämpötila oli kokeen alla -4°C.



Kuva 21. Esimerkki mäntyosapuun kuoriutumuksesta yhdistelmäkuorimossa. Viisi oikealla olevaa pölkkyä on läpäissyt vain piiskauksen, viisi vasemmalla olevaa pölkkyä on läpäissyt sekä piiskauksen että rummutuksen.

Kuoritun kuitupuun kertymä oli karsitulla ensiharvennumännillä lähes 90 % ja karsimattomalla 75 % syötteen biomassasta. Karsimattomasta osapuusta syntyy energiapuuksi soveltuvaa prosessitähdettä yli kaksi kertaa niin paljon kuin karsitusta kuitupuusta. Oksat, pääosa kuoresta ja pääosa runkohukkapuusta poistuvat jo piiskauksessa (kuva 21). Rummutusvaiheeseen jäävän kuoren määrä on vain puolet tavanomaisesta, niin että tullaan toimeen pienellä aukkopinnalla:

Erä	Karsinta-aste	Piiskaustähde		Rumputähde		Kaikki tähde	Kuitupuu
		Oksat	Kuori+puu	Kuori+puu	Osuus syöttestä, %		
1	Karsittu	0,0	7,8	3,3		11,1	88,9
2	Karsittu	0,0	7,4	2,7		10,1	89,9
3	Karsimaton	11,3	10,4	2,9		24,6	75,4

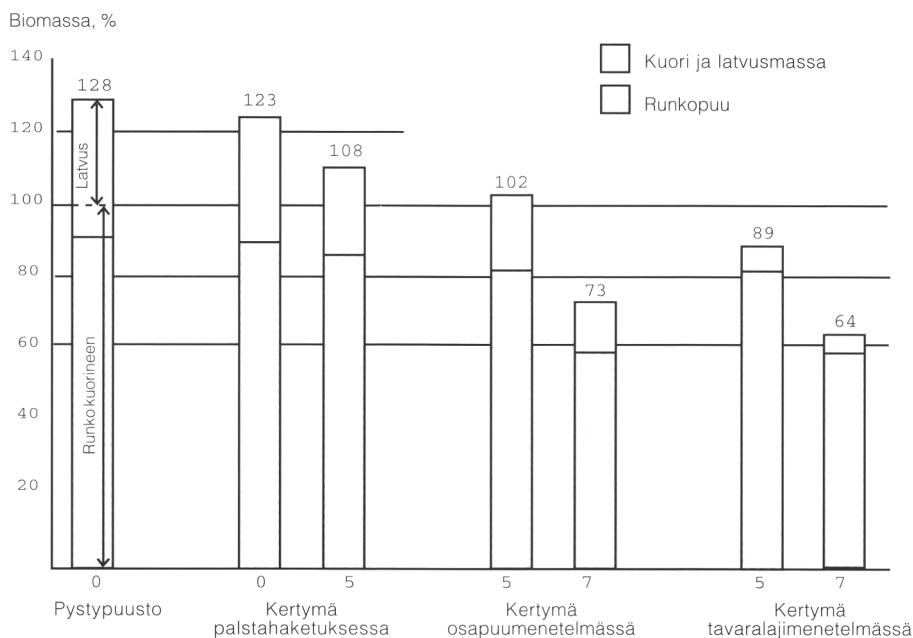
Ketjukarsinta-kuorinnan ja rumpukuorinnan yhdistelmä tarjoaa kehityskelpoisen ratkaisun sekä karsitun että karsimattoman ensiharvennumännyn tehdasvarasto- ja terminaalikäsittelyyn. Myös muilla puulajeilla alustavat tulokset ovat rohkaisevia. Ensimmäiseen prototyypilaitokseen tehtävien teknisten muutosten ja tehokkaamman prosessinhallinnan voidaan odottaa edelleen alentavan runkopuun hävikkiä ja hakkeeseen jäävän kuoren määrää. Tutkimukset jatkuvat vuonna 1996, kun Pertti Szepaniak Oy:lle valmistuu Enso-Gutzeit Oy:n Kaukopään tehdasvarastolle sijoitettava, yhdistettyyn ketjukarsinta-kuorintaan ja rumpukuorintaan perustuva kiinteä puunkäsittelyasema, jota suunniteltaessa on otettu huomioon prototyypilaitoksella tehtyjen koeajojen ja tutkimusten tulokset.

7 Loppupäätelmät

7.1 Korjuumenetelmän vaikutus kertymään

Korjuumenetelmältä vaaditaan korkeata tuottavuutta, alhaisia kustannuksia, ympäristöystävällisyyttä, hyvää työnjälkeä, laadukasta tuotetta ja korkeata talteensaantiastetta. Tässä luvussa tarkastellaan talteensaantiastetta biomassakertymän valossa. Lähtökohtana on Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköstä poistettava pystypuusto, jonka runkomassasta 90 % on puuainesta ja 10 % kuorta ja jossa sen lisäksi, kuivat oksat mukaan lukien, on rungon massa verrattuna keskimäärin 28% latvusmassaa (luku 3).

Taulukossa 23 ja kuvassa 22 vertaillaan biomassakertymää kuudessa vaihtoehtoisessa korjuuratkaisussa. Kussakin tapauksessa tarkastellaan luvun 3.3.1 esimerkkileimikköä siten, että mukaan on otettu kaikki rinnakorkeudella 8 cm täyttävät puut. Kokopuu-haketuksen ensimmäisessä vaihtoehdossa puu otetaan talteen kokonaisuudessaan pyrkimättä vaikuttamaan kertymän biomassakoostumukseen tai rajoittamaan metsämaan ravinnetappioita. Toisessa kokopuu-haketuksen vaihtoehdossa latva katkaistaan tasan 5 cm:stä. Muissa menetelmissä noudatetaan koneellisen puunkorjuun 5/3+ m:n apteraussääntöä sekä 5 tai 7 cm:n vähimmäislatvaläpimittaa, jota pölkyn pituusrajoitteista johtuen ei läheskään aina saavuteta.



Kuva 22. Suhteellinen biomassakertymä kannolta tienvarteen palstahaketus-, osapuu- ja tavaralajimenetelmää ensiharvennusmännikössä käytettäessä runkopuun vähimmäislatvaläpimittavaatimuksen ollessa 0, 5 tai 7 cm. Kuorellisen rungon kuivamassa pystypuustossa saa arvon 100.

Biomassakertymän kannalta tehokkain ratkaisu on kokonaisten puitten palstahaketus. Vain 4 % biomassasta, koostuen paljolta katkeilevista kuivista oksista, jää palstalle. Tuotteena on kuitenkin pelkästään polttohake, eikä menetelmä ravinnetasapainosyistä sovellu köyhille kasvupaikoille, joilla osa latvusmassasta tulee jättää tähteeksi.

Toista äärimmäisyyttä edustaa nykykäytännön mukainen tavaralajimenetelmä, jossa pölkyn vähimmäisläpimittavaatimuksena on 7 cm. Tuolloin vain puolet poistetun puuston biomassasta saadaan talteen. Kysymyksessä on kuitenkin kuituteollisuuden kannalta arvokkain osa raaka-aineesta. Tavaralajimenetelmän kertymä kasvaa esimerkkileimikossa runsaalla kolmanneksella, jos latvaläpimittavaatimus alenee 5 cm:iin. Mikäli karsimisesta luovutaan ja puut korjataan osapuuna, biomassakertymä kasvaa latvusmassan ansiosta kummassakin läpimittavaihtoehdossa tavaralajimenetelmään verrattuna noin 15 %.

Puuston koon kasvaessa menetelmien väliset kertymäerot supistuvat. Ellei leimikossa ole lainkaan rinnankorkeusläpimitaltaan alle 10 cm:n puita, talteen saatavan runkopuun osuus kasvaa oleellisesti, ja 5 ja 7 cm:n latvaläpimittavaihtoehtojen välinen kertymäero jää vähäiseksi.

Taulukko 23. Eri korjuumenetelmien biomassakertymä kuvan 15 esimerkkileimikossa, kun latvan katkaisuläpimitta on 0, 5 tai 7 cm. Pystypuuston kuorellisen runkopuun kuivamassa (taulukossa kehystettynä) saa arvon 100.

Korjuumenetelmä	Latvan läpimitta, cm	Rungon puu	Rungon kuori	Latvusmassa	Kaikki massa
Suhteellinen kertymä					
Pystypuuston massa	0	89,9	10,1	28,0	128,0
Kokopuun palstahaketus	0	88,0	9,9	25,0	122,9
Kokopuun palstahaketus	5	84,0	9,4	14,3	107,7
Osapuumenetelmä	5	80,9	9,1	12,0	102,0
Tavaralajimenetelmä	5	80,9	7,8	-	88,7
Osapuumenetelmä	7	58,6	6,4	8,0	73,0
Tavaralajimenetelmä	7	58,6	5,5	-	64,1
Kertymän koostumus					
Pystypuuston massa	0	70,2	7,9	21,9	100,0
Kokopuun palstahaketus	0	71,6	8,1	20,3	100,0
Kokopuun palstahaketus	5	78,0	8,7	13,3	100,0
Osapuumenetelmä	5	79,3	8,9	11,8	100,0
Tavaralajimenetelmä	5	91,2	8,8	-	100,0
Osapuumenetelmä	7	80,3	8,8	10,9	100,0
Tavaralajimenetelmä	7	91,4	8,6	-	100,0

7.2 Karsinta- ja kuorintamenetelmien vertailu

Ensiharvennusten taloudellisuuden kannalta on keskeistä, että mahdollisimman suuri osuus korjuun biomassakertymästä saadaan erotetuksi laadukkaaksi kuituraaka-aineeksi. Toinen tavoite on, että kuituraaka-aineeksi soveltumaton osa biomassasta saadaan talteen energiapuuna siinä laajuudessa, kuin ekologisesti kestävä metsätalouden kannalta on suotavaa.

Luvussa 6 kuvataan useita Metsäntutkimuslaitoksen, Metsätehon, Enso-Gutzeit Oy:n, Enocell Oy:n ja Pertti Szepaniak Oy:n yhteistyönä bioenergian tutkimusohjelman puitteissa vuosina 1993-1995 tehtyjä ensiharvennusmännyn karsinta- ja kuorintakokeita. Tämä luku on yhteenveto kokeitten tuloksista.

Kuvattujen vaihtoehtojen lisäksi VTT Energia on panostanut vahvasti kokopuu-hakkeen lajitteluun n.s. massahakemenetelmällä, ja sen kehitystyön tuloksena BMH Wood Technology on rakentanut Kankaanpään Massahake Oy:lle vuonna 1995 valmistuneen kokopuu-hakkeen puhdistuslaitoksen. Sen käsittelykapasiteetti on 25 m³ kokopuuraaka-ainetta tunnissa ja kokonaisinvestointikustannus rakennukset, puutavaran vastaanotto ja hakkuri mukaan luettuina 14,7 milj. mk. Käyttöhenkilökuntana on 2 miestä.

Reikäroottorikuorinta

Reikäroottorikuorinta tapahtuu yksin puin. Tuottavuus ja kustannukset riippuvat jyrkästi puun läpimitasta, ja siksi sitä käytetään lähinnä vain järeälle saha- ja vaneripuulle. Menetelmä soveltuu kuitenkin myös kuitupuulle, mutta puun on oltava karsittua, syöttönopeuden suuri ja puuvirran jatkuva.

Pertti Szepaniak Oy:n kuorinta- ja haketusasema Imatralla on ainoa reikäroottoritekniikkaa soveltava kuitupuun käsittelyasema Suomessa. Investointikustannus on hakkuri mukaan luettuna 4 milj. mk. Asemalla tarvitaan 2 miestä työvuoroa kohti.

Aseman kapasiteetti on ensiharvennusmännillä 35-40 m³/h eli kaksivuorotyössä noin 140 000 m³ vuodessa. Kapasiteetti nousisi merkittävästi, mikäli ohuimmat pölkyt eroteltaisiin muulla tavoin kuorittaviksi.

Kaksoisroottorin ansiosta kuorinnan jälki on hyvä. Normaalioloissa hakkeen kuoripitoisuudeksi jää suurellakin syöttönopeudella vain 0,1-0,2 %. Runkopuun hävikki on kohtuullinen 2-3 %. Leimikosta poistetun puuston runkopuusta ja energiakomponentista saadaan talteen seuraava osuus:

Kuitupuu, latvaläpimitta 5 cm Kuitupuu, latvaläpimitta 7 cm
Lopullinen kertymä, % poistumasta

Runkopuu	87	64
Energiapuu	28	21

Rumpukuorinta

Metsäteollisuuden kuitupuu kuoritaan lähes poikkeuksetta rummussa. Koska raaka-aineen koostumuksessa ja laadussa sekä rumpukuorimoitten teknisissä ratkaisuissa on eroja, kuorimoitten soveltuvuus ensiharvennumännylle vaihtelee. Kysymys on paitsi laiteratkaisuista myös laadunvalvonnasta korjuussa ja varastoinnissa, tehdasvarastojärjestelyistä sekä kuorinnan ja haketuksen prosessisäädöistä. Veitsiluoto Oy:n tehtailla rumpukuorimon puunkäsittelykustannukseksi ilmoitetaan karsitulla kuitupuulla 20-30 mk/m³ ja karsimattomalla osapuulla 25-35 mk/m³ (Nousiainen ym. 1995).

Keskeiset kokeet tehtiin Uimaharjulla Enocell Oy:n kaksilinjaisella kuorimolla, joka edustaa kehittyneintä rumpukuorintatekniikkaa. Se on tarkoitettu karsitulle kuitupuulle, mutta siellä on mahdollista käsitellä esimerkiksi 10 %:n seossuhteessa myös karsimattomaa osapuuta. Osapuu aiheuttaa kuitenkin lisäjärjestelyjä tehdasvarastolla, ja runkopuun hävikki kohooa karsimattomalla osapuulla korkeammaksi kuin karsitulla kuitupuulla. Normaalioloissa kuorimon kapasiteetti on kummallakin linjalla noin 300 m³/h, eikä karsittu ensiharvennuspuu näytä rasittavan kapasiteettia.

Jos ensiharvennuspuuta rummutetaan erilliskäsittelyssä omana tavaralajinaan, Uimaharjun kuorimolla saavutetaan alhainen 0,1-0,4 %:n kuoripitoisuus sekä kohtuullinen 2-3 %:n runkopuun hävikki. Jos kuitupuu on tehty yksioteharvesterilla joukkokarsintaa käyttäen, runkopuun hävikki rumpukuorinnassa kasvaa ehkä prosenttiyksikön verran. Normaalin kuitupuun ja ensiharvennuspuun seoskuorinnassa (90% + 10%) hakkeen laatu säilyy korkeana ja runkopuun hävikki kohtuullisena.

Ensiharvennumänniköstä poistetun puuston runkopuusta ja energiakomponentista saadaan talteen seuraava osuus. On huomattava, että tämä edullinen tulos edustaa vain Enocell Oy:n rumpukuorimoita ja senkin osalta vain ensiharvennumännyn erilliskuorintaa. Monilla muilla kuorimoilla ja sekäkäsittelyssä on varauduttava suurempaan hävikkiin ja pienempään kuitupuun kertymään.

Kuitupuu, Kuitupuu, Osapuu,
latvaläpimitta 5 cm latvaläpimitta 7 cm latvaläpimitta 5 cm
Lopullinen kertymä, % poistumasta

Runkopuu	87	64	86
Energiapuu	28	21	63

Ketjukarsinta-kuorinta

Ketjukarsinta-kuorintatekniikka on kehitetty nimenomaan karsimattomalle puulle. Kalusto on yleensä siirreltävää, niin että sitä voidaan käyttää sekä tilavalla metsävarastolla että terminaalilla ja tehdasvarastolla. Pertti Szepaniak Oy:n muuntamana Peterson Pacific DDC 5000 ketjukarsija-kuorija-hakettaja soveltuu myös pienikokoiselle osapuulle. Kaluston investointikustannus ilman prosessitähteen murskainta on 3 milj. mk. Työryhmässä on 2 miestä.

Jos yksikkö työskentelee terminaalilla 2700 tuntia vuodessa ja raaka-aineena on karsimaton ensiharvennusmänty, sen vuosikapasiteetti on 100 000 m³ (250 000 i-m³) selluhaketta. Sivutuotteena syntyy kuivamassana mitattuna noin 10 000 t prosessitähdettä.

Keskimääräinen runkopuun hävikki on osapuulla 3 %. Kuoripitoisuus alittaa vain parhaimmillaan 1 %:n rajan. Kovalla pakkasella se nousee jopa 3-4 %:iin. Tuottavuus kohoaa ja runkopuun hävikki ja hakkeen kuoripitoisuus alenevat osapuun läpimitan kasvaessa, mutta muutos ei ole jyrkkä. Runkopuun ja energia-komponentin kertymä on seuraava:

	Osapu, latvaläpimitta 5 cm Lopullinen kertymä, % poistumasta	Osapu, latvaläpimitta 7 cm
Runkopuu	86	63
Energiapuu	61	39

Ketjukarsinta-kuorintatekniikka soveltuu karsimattomalle osapuulle, ja investointikustannukset ovat rumpukuorintaan verrattuina alhaiset. Runkopuun hävikki voidaan pitää kohtuullisella tasolla, mutta riittävän alhaisen kuoripitoisuuden saavuttaminen on osoittautunut vaikeaksi. Erityisesti jäätyneen ja kuivuneen puun kuoripitoisuus pyrkii jäämään liian suureksi.

Energiapuuta kertyy karsittuun kuitupuuhun verrattuna kaksinkertaisesti. Sen hyödyntäminen edellyttää työskentelyä päällystetyllä tai jäätyneellä terminaalikentällä. Häiriötön syöttö polttokattilaan saattaa edellyttää prosessitähteen erillistä murskausta.

Ketjukarsinta-kuorinnan ja rumpukuorinnan yhdistelmä

Ketjukarsinta-kuorinnan suuri etu on soveltuvuus karsimattomalle puulle, mutta ongelmana on epätydyttävä kuorintajälki erityisesti vaikeissa olosuhteissa. Rumpukuorinnassa taas kuorintajälki on hyvä, mutta menetelmä ei sovellu erityisen hyvin karsimattomalle puulle, ja pienten ensiharvennuspuuerien erilliskäsittely ja ensiharvennushakkeen erillään pitäminen aiheuttavat tehdasvarastolla lisäjärjestelyjä.

Pertti Szepaniak Oy:n prototyypilaitoksessa yhdistetään kummankin menetelmän edut. Ensimmäisessä vaiheessa sovelletaan kevennettyä piiskausta karsintaan, jolloin tapahtuu myös kuoriutumista sekä jäljelle jäävän kuoripinnan rikkoutumista. Piiskauskäsittelystä pölkyt kulkeutuvat yhdensuuntaisrumpuun, jossa kuorinta viimeistellään vettä käyttämättä. Esikuorinnan ansiosta myös rummutus voidaan toteuttaa esimerkiksi pyörimisnopeuden ja puutavaran viipymän suhteen perinteistä tehdasrummutusta keveämpänä. Näin voidaan supistaa runkopuun hävikkiä.

Prototyypin ensimmäisissä koeajoissa ensiharvennuskannan runkopuun hävikki oli 1-4 % ja hakkeen kuoripitoisuus 0,4 %. Leimikosta poistetun puuston runkopuun ja energiakomponentin kertymä oli seuraava:

	Kuitupuun, latvaläpimitta 5 cm	Osapuu, latvaläpimitta 5 cm	Osapuu, latvaläpimitta 7 cm
	Lopullinen kertymä, % poistumasta		
Runkopuu	88	88	64
Energiapuu	24	60	41

Nämä koetulokset ovat vasta suuntaa-antavia. Esikokeitten perusteella rakennettavaan uuteen laitokseen tehdään tuottavuuteen, puunhävikkiin ja kuorintatulokseen vaikuttavia muutoksia. *Mahdollisuudet teknisiin parannuksiin näyttävät lupaavammilta kuin muissa tutkimuksen kohteena olleissa vaihtoehdossa.*

Uuden laitoksen investointikustannus on hakkuri mukaan luettuna 5-6 milj. mk ja kapasiteetti 40-60 m³/h eli kaksivuorotyössä 150 000 - 200 000 m³ kuorellista kuitupuuta vuodessa.

7.3 Ensiharvennuskannan erityisominaisuuksien hyödyntäminen

Ensiharvennusohjelman toteutuminen on tärkeätä paitsi pitkäntähtäyksen metsänhoidon myös massa- ja paperiteollisuuden laajenevan puuhuollon kannalta. Siltä osin kuin tämän biomassareservin käyttö kuituteollisuuden raaka-aineeksi ei ole mahdollista, ensiharvennusleimikot on toissijaisesti nähtävä uudistuvan energian lähteenä.

Jos harvennushakkuut voitaisiin toteuttaa hyvän metsänhoidon edellyttämässä laajuudessa, ensiharvennusleimikoista hakattaisiin pelkästään Suomen eteläpuoliskon alueelta vuosittain 3,9 milj. m³ kuorellista mäntyrunkopuuta, latvusmassa mukaan luettuna kaikkiaan 5,0 milj. m³ eli 1,8 milj. kuivatonna biomassaa.

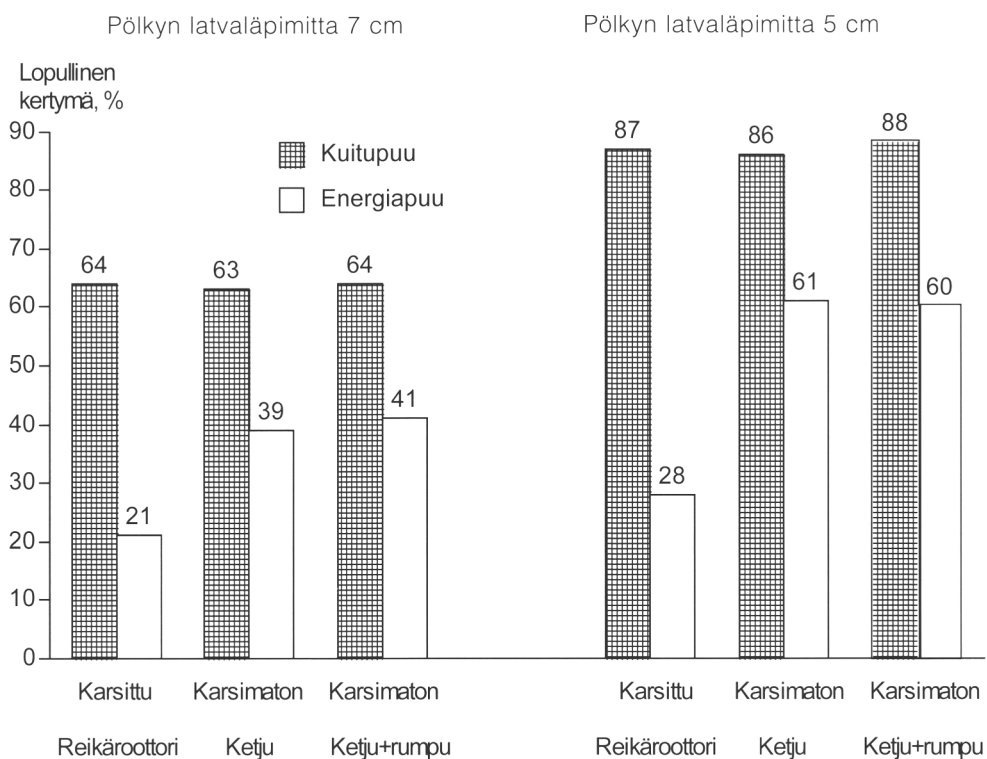
Kansantalouden kannalta on edullista käyttää mahdollisimman suuri osa ensiharvennuspuusta massa- ja paperiteollisuuden raaka-aineeksi. Myös metsänkasvattajan kantorahatulo on näin menetellen suurin. Luvussa 5 on esitetty käyttösuositus, jonka lähtökohtina ovat toisaalta biomassan tekniset ominaisuudet sekä toisaalta metsämaan kestävä tuottokyky säilyttäminen. Sen mukaisesti Etelä-Suomen *ensiharvennusleimikoitten vuotuinen hakkuutavoite sisältää 3,0 milj. m³ eli 1,2 milj. kuivatonna läpimitaltaan yli 5 cm:n paksuista kuoretonta mäntykuitupuuta, josta 47 %:n saannolla olisi mahdollista valmistaa 0,56 milj. t sulfaattisellua.*

Edellisen ohella ensiharvennusleimikoitten mäntypuun hakkuutavoitteeseen sisältyy 1,9 milj. m³ eli 0,7 milj. kuivatonna energiapuuta. Jotta metsämaan ravinnetasapaino ei horjuisi, energiapuuksi luokiteltava alle 5 cm:n paksuinen latvakappale oksineen tulisi kuitenkin jättää kasvupaikalle. Tällöin *energiapuun vuotuinen käyttösuositus olisi 0,4 milj. kuivatonna, jonka bruttoenergia-arvo on 40 %:n kosteudessa 2,1 TWh.*

Ensiharvennusmännyn taloudellisen käytön kannalta on keskeistä, että niin kuitu- kuin energiakomponenttikin saadaan talteen laadukkaana ja *ettei arvokasta kuituraaka-ainetta joudu erotteluvaiheessa energiakäyttöön.* Luvussa 6 on osoitettu, että tämä tavoite voidaan saavuttaa tyydyttävästi ainakin parhailta rumpukuorimalaitoksilla ensiharvennuspuun erilliskäsittelyssä sekä reikäroottorikuorimakoneella yksinpuinkäsittelyssä, mutta kumpikin menetelmä on tarkoitettu karsitulle puulle. Uuden, myös karsimattomalle osapuulle soveltuvan ratkaisun tarjoaa ketjukarsinnan ja kevyen kuivarumpukuorinnan yhdistelmä. Menetelmä on vasta prototyyppiasteella, mutta sen kehityspotentiaali on suuri. Ensimmäisten koeajojen mukaan sen etuja ovat kapasiteettiin nähden alhaiset investointi- ja käyttökustannukset, ympäristöystävällisyys, kohtuullinen runkopuun hävikki, hyvä hakkeen laatu sekä soveltuvuus karsimattomalle osapuulle.

Menetelmävaihtoehtojen biomassataseet osoittavat, että nykyistä 7 cm:n latvaläpimittavaatimusta ja koneellisen hakkuun 5+3 m:n pituusapteerausohjetta noudatettaessa rungon kaikesta puuaineesta saadaan kuituhakkeeksi tuskin kaksi kolmannesta, jos leimikossa on runsaasti rinnankorkeusläpimitaltaan alle 10 cm:n puita. Kun leimikko järeytyy ja pienten puitten osuus supistuu, kertymäosuus kasvaa merkittävästi. Mutta jos latvaläpimitta alennetaan 5 cm:iin, saadaan hakkeena talteen peräti 87% runkopuusta sellaisestakin leimikosta, jossa pienikokoisia puita on paljon (kuva 23). Kun alle 5 cm:n latvapuu jätetään epäedullisten ominaisuuksiensa vuoksi pois laskennallisesta tavoitteesta, kuitupuun kertymä nousee itse asiassa 94 %:iin potentiaalisen kuitupuun määrästä.

Kun tavaralajimenetelmän sijasta valitaan osapuumenetelmä, energiapuun kertymä kaksinkertaistuu kummassakin latvaläpimittavaihtoehdossa, mutta kuitupuun kertymään muutos vaikuttaa tuskin lainkaan. Huomattakoon, että kuitupuuhun lopullisesti jäävä osuus kuoresta on kaikissa edellä esitetyissä kertymälaskelemissa katsottu haitallisuutensa vuoksi kokonaan menetetyksi, vaikka sekin todellisuudessa pääosiltaan saadaan jäteliemen muodossa energiakäyttöön.

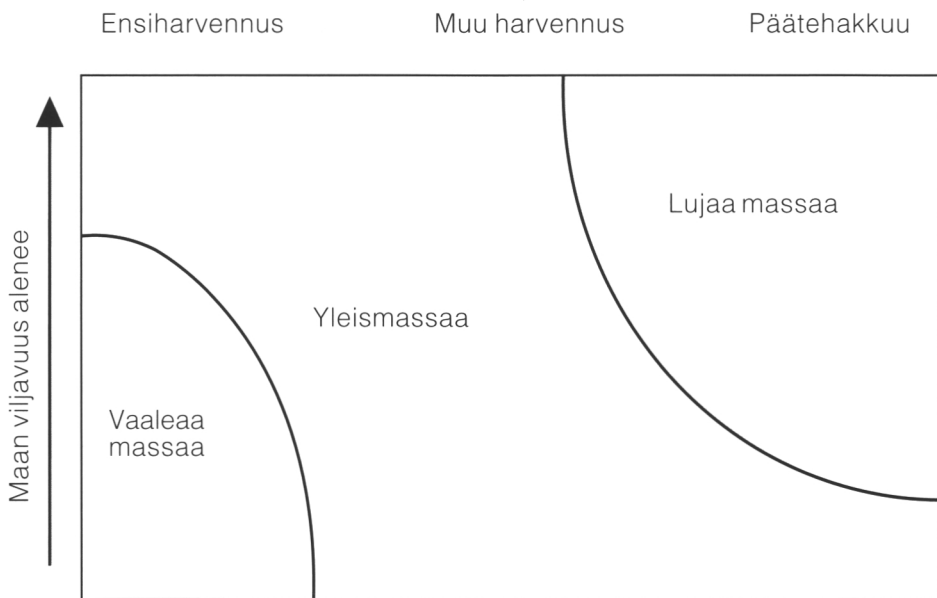


Kuva 23. Kuitupuun lopullinen kertymäosuus tehtaalla verrattuna pysty- puuston potentiaaliseen kuitupuuhun (läpimita yli 5 cm), ja energia- puun lopullinen kertymäosuus tehtaalla verrattuna pystypuuston ensi- sijaiseen energiapuuhun (alle 5 cm:n runkopuu, kuori ja latvusmas- sa), pölkyn latvaläpimitasta sekä karsinta- ja kuorintamenetelmästä riippuen.

Koska ensiharvennumänty poikkeaa raaka-aineominaisuuksiltaan muusta kuitu- puusta (luku 2), sen erityisominaisuudet tulee ottaa raaka-ainehuollossa ja laadu- nohjailussa huomioon. *Ensiharvennumäntyä kannattaa käsitellä omana tava- ralajinaan, ja sitä voidaan luokitella teknisten ominaisuuksiensa vaihtelun pohjalta esimerkiksi pölkyn läpimitan perusteella tai tyvipölkkyt latvapölkkyistä erottamalla.* Tällaisin lajittelukeinoin mäntykuitupuusta syntyisi laatuluokkia, joit- ten erot olisivat suurempia kuin mänty- ja kuusikuitupuun väliset keskimääräiset erot. Kutakin laatuluokkaa voitaisiin käsitellä kuorintavaiheessa ja keitossa sille tarkoituksenmukaisinta tekniikkaa soveltaen.

Erilliskuorinta mahdollistaa myös erillishaketuksen ja hakkeen erillisvarastoinnin. Massan ominaisuuksien vaihtelu tasoittuu, kun *ensiharvennumännystä valmis- tetty hake voidaan sekoittaa ennen keittoa muuhun hakkeeseen hallitussa ja tasaisessa suhteessa.*

Poikkeavia ominaisuuksia voidaan hyödyntää vieläkin pitemmälle, jos keitto tapahtuu muusta hakkeesta erillään yksilöllisin kemikaali-, keittoai-ka-, jauhatus- ja valkaisu-säädöin. Näin saatava erikoismassa ohjataan kuituominaisuuksiensa vastaaviin erikoispapereihin, joissa esimerkiksi repäisy-lujuus ei ole keskeinen kriteeri, tai myydään omana markkinamas-salaatunaan. Ruotsalaiset kuusikuitupuuta koskevat tutkimukset osoittavat, että lajittelua voidaan tehdä puuston iän ja kasvunopeuden perusteella leimikkopohjai- sesti (kuva 24). Samaa periaatetta sovelletaan jossain määrin muun muassa Uudessa Seelannissa radiatamännillä, josta leimikkolajittelun kautta voidaan tuottaa erilaisia massoja erilaisiin tarkoituksiin (Kibblewhite 1980 & 1991, Kibblewhite & Bawden 1990 ja 1991, Williams 1993). Myös Yhdysvaltain etelävaltioitten keltamännystä on todettu, että vaikka nuoresta puusta tehdyn sellun repäisy-lujuus on heikko, sen muut lujuusominaisuudet samoin kuin monet painatustekniset ominaisuudet ovat keskimääräistä parempia (Curtis & Saucier 1992).



Kuva 24. Hallsta Pappersbrukin leimikkopohjainen lajittelujärjestelmä mekaanisen massan valmistukseen käytettävälle kuusikuitupuulle Ruotsissa (Berg ym. 1995).

Viitekirjallisuus

- Berg, M., Bjurulf, A. & Löfgren, M. 1995. Uppdelning av granmassaved efter egenskaper. Skogforsk. Resultat 6. 4 s.
- Brantseg, A. 1962. Irrigation and twig-covering experiments in Scots pine forests. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 55.7. 14 s.
- Curtis, A. B. Jr. & Saucier, R. 1992. Juvenile wood from pine plantations poses problems for manufacturers and forest managers. U. S. Forest Service, Management Bulletin R 8-MB 59. 2 s.
- Brunberg, B. 1991. Tillvaratagande av skogsbränsle. Träddelar och trädrester. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten. Redogörelse 5. 52 s.
- Favreau, J. 1992. Peterson-Pacific DDC 5000 delimber-debarker-chipper: New Observations. *Feric Field Note: Processing-29*. 3 s.
- Franklin, G.L. 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites and a new macerating method for wood. *Nature* 3924. s. 51.
- Gislerud, O. 1974. Heltreutnyttelse. II. Biomasse og biomasseegenskaper hos tynningsvirke av gran, furu, bjørk och or. *Rapp. Norsk. Inst. Skogforsk.* 6, 59 s.
- Hakala, R. 1983. Ensiharvennuspuun rumpukuorintakoe TA:lla. Enso-Gutzeit Oy:n tutkimuslaitos. *Koeseloste*. 4 s.
- Hakkila, P. 1962. Polttohakepuun kuivuminen metsässä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54.6. 81 s.
- Hakkila, P. 1966. Investigations on the basic density of Finnish pine, spruce and birch wood. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96.3. 59 s.
- Hakkila, P. 1967. Vaihtelumalleja kuoren painosta ja painoprosentista. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 62.5. 35 s.
- Hakkila, P. 1968a. Geographical variation of some properties of pine and spruce pulpwood in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 66.8. 60 s.
- Hakkila, P. 1968b. Sahanhakkeen puuaineen ominaisuuksista. *Haketutkimustoimikunnan moniste*. Helsinki. 14 s.
- Hakkila, P. 1979. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 96.3. 59 s.
- Hakkila, P. 1989. Utilization of residual forest biomass. Springer-Verlag. Berlin. 568 s.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Summary: Crown mass of trees at the harvesting phase. *Folia Forestalia* 773. 24 s.
- Hakkila, P. (toim.) 1992. Metsäenergia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. 51 s.
- Hakkila, P. & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. *Folia Forestalia* 552. 37 s.
- Hakkila, P. & Kalaja, H. 1993. Ketjukarsinta ensiharvennusmännikön korjuuratkaisuna. *Folia Forestalia* 803. 31 s.
- Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteuttamisvaihtoehdot. 1992. Maa- ja metsätalousministeriö. 121 s.
- Hillring, B. 1994. Utvärdering av skogsbränslesystem med träddelar. Sveriges Lantbruksuniversitet. Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat nr 275. 171 s.
- Huovinen, J. 1993. Ensiharvennusmännyn kuorinta ja haketus Kurkvuoreessa. Enso-Gutzeit Oy, metsäosasto. 8 s.

- Imponen, V. 1993. Hake-, puu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisu- ja 3: 239-252.
- Imponen, V. 1995. Hake-, -puu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa. Projektin 110. Puupolttoaineiden seurantar ryhmän kokoukselle 15.10.1995 esitetty kalvosarja.
- Isomäki, A. 1994. Ajouran leveyden määrittäminen. Summary: Determination of strip road width. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 501. 66 s.
- Jacobson, S., Kukkola, M., Mälkönen, E., Möller, G. & Tveite, B. 1994. Growth response of coniferous stands to whole-tree thinning. Manuscript. 24 s.
- Jalava, M. 1952. Puun rakenne ja ominaisuudet. Werner Söderström Osakeyhtiö, Porvoo. 352 s.
- Jonsson, T. 1989. Nya vedsortiment. Teoksessa: Renseri konferens med tema Styrning av renseri och virkesflöde. STFI meddelande D337: 49-56.
- Kibblewhite, R. P. 1980. Radiata pine corewood and slabwood, and their interrelations with pulp and handsheet properties. New Zealand Journal of Forest Science Vol. 10(3): 533-550.
- Kibblewhite, R. P. 1991. Radiata market kraft pulp qualities. Deutsche Papierwirtschaft 1991/1: T68-T72.
- Kibblewhite, R. P. & Bawden, A. D. 1990. Blends of extreme high and low coarseness radiata pine kraft pulps - fibre and handsheet properties. Appita Vol. 43(3): 199-207.
- Kibblewhite, R. P. & Bawden, A. D. 1991. Radiata pine thinnings and toplog kraft pulp qualities. PAPRO Report B 74:201-206.
- Korpilahti, A., Varhimo, A., Koskinen, S. & Lemmetty, J. 1995. Mäntykuitupuun minimiläpimitan vaikutus puunhankintaan ja sellunvalmistukseen. Metsätehon Katsaus 11. 6 s.
- Kuitto, P.-J. & Rieppo, K. 1993. Peterson Pacific DDC 5000-ketju-karsinta-kuorinta-haketusyksikkö ensiharvennuspuun hankinnassa. Metsätehon Katsaus 3. 8 s.
- Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1993. Hakkuutähteiden merkitys harvennuseksiköiden kasvulle. Konekirjoite. 10 s.
- Kärkkäinen, M. 1976a. Havutukkien kuoren tiheys ja kosteus. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 87.5. 24 s.
- Kärkkäinen, M. 1976b. Puun ja kuoren tiheys ja kosteus sekä kuoren osuus koivun, kuusen ja männyn oksissa. Silva Fennica 10 (3): 212-236.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108. 74 s.
- Lilleberg, R. 1995. Harvennustapa männikön ensiharvennuksessa. Metsätehon Katsaus 3. 8 s.
- Marklund, L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges Lantbruksuniversitet. Institutionen för skogstaxering. Rapport 45.
- Metsätilastollinen vuosikirja 1995. 1995. Metsäntutkimuslaitos. 354 s.
- Mälkönen, E. 1974. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 84.5. 87 s.
- Niemeläinen, P. 1992. Mäntyrunkopuun raaka-ainetase ketjukarsinta-menetelmässä.

- Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 40 s.
- Niiranen, M. 1985. Tutkimus rumpukuorinnan prosessiteknisestä mitoituksesta. Helsingin teknillinen korkeakoulu, sellutekniikan laboratorio. Raportti 17. Sarja A. 139 s.
- Nousiainen, I., Imponen, V., Jaatinen, E. & Korpilahti, A. 1995. Puupolttoaineiden tuotantomenetelmät. Nykytekniikka, kustannukset ja kehittämismahdollisuudet. Bioenergian tutkimusohjelma, julkaisuja 5. 95 s.
- Nurmi, J. 1993. Heating values of the above ground biomass of small-sized trees. Acta Forestalia Fennica 236. 30 s.
- Paavilainen, L. 1993. Importance of cross-dimensional fibre properties and coarseness for the characterisation of softwood sulphate pulp. Paperi ja Puu - Paper and Timber 75: 343-351.
- Parikka, M. & Vikinge, B. 1994. Kvantiteter och ekonomi vid bränsle- och massaveduttag i första gallring. Sveriges Lantbruksuniversitet. SIMS. Rapport 37. 115 s.
- Perrier, J.C. 1990. A study of chip quality from the Peterson Pacific DDC 5000. School of Forestry, Lakehead University. 71 s.
- Poikela, A. 1995. Latvusmassan pituussuuntainen jakauma. Käsikirjoitus. 16 s.
- Pulkkinen, P. & Asikainen, A. 1994. Puupolttoaineen murskaaminen Morbark 1200 murskaimella. Moniste. 13 s.
- Rieppo, K., Poikela, A., Hakkila, P. & Aho, V.-J. 1995. Puupolttoaineen ja selluhakkeen integroitu tuotanto ketjukarsinta-kuorintatekniikalla. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 6. Vuosikirja 1994. Osa I: Puupolttoaineiden tuotanto: 189-205. VTT Energia.
- Salminen, S. 1993. Eteläisimmän Suomen metsävarat 1986-1988. Folia Forestalia 825. 111 s.
- Seppänen, V. & Ahonen, M. 1995. MASSAHAKE-menetelmän soveltaminen koivulle ja hierteen raaka-ainetuotantoon. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 6: 175-187.
- Seth, R. S. & Page, D.H. 1988. Fiber properties and tearing resistance. Tappi 81: 103-107.
- StAAF, H. 1984. Harvesting of logging slash on highly productive sites. Buffering of negative effects. Teoksessa: Andersson B. & Falk, S. (toim.). Forest energy in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. s. 96-97.
- Tamminen, Z. 1962. Fuktighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. I. Tall. Kungl. Skogshögskolan, Institutionen för virkeslära. Uppsatser R41.
- Tapion vuosikirja 1993. 1994. Helsinki. 59 s.
- Tveite, B. 1983. Heiltretynning - fare for tillveksstap. Aktuelt fra statens fagtjeneste for landbruket 3: 98-105.
- Walker, J.C.F. 1993. Primary wood processing: Principles and practice. Chapman & Hall, Lontoo. 595 s.
- Vesisenaho, T. 1994. Ensiharvennusmäntykuitupuun rumpukuorinnan ja haketuksen raaka-ainetase. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 63 s.
- Williams, M. 1993. The effect of raw material quality on the pulp and paper industry. Teoksessa: Proceedings of a LIRO/FIEA Seminar Held in Rotorua, June 1993. Logging Industry Research Organization, New Zealand. 11 s.

Liite 1. Tietoja karsinta- ja kuorintakokeitten raaka-aineesta ja koejärjestelyistä.

6.1 Reikäroottorikuorinta

Kokeen puuraaka-aine

Tutkimussarja koostui kolmesta erillisestä kokeesta. Ensimmäisessä kokeessa lokakuussa 1992 kuorittiin ensiharvennusmäntyä, myöhemmissä kokeissa maalissa ja kesäkuussa 1995 normaalia mänty-, kuusi- ja koivukuitupuuta. Mäntypölkkyjen keskimääräiset mitat olivat:

	Läpimitta pölkyn keskellä, cm	Pölkyn pituus, m	Raaka-aineen määrä, m ³
Koe 1, ensiharv. mänty	11,7	4,0	823
Koe 2, normaalimänty	..	4,1	103
Koe 3, normaalimänty	11,1	4,0	99

Puu oli kaikissa kokeissa tuoretta. Toisen kokeen aikana maaliskuussa vallitsi -1°C pakkasena. Puu oli jossain määrin jäätynyttä mutta ei niin paljon, että se olisi oleellisesti haitannut kuorintaa.

Koejärjestely

Kuorimakoneen teräsäädöt tarkistettiin valmistajan toimesta kunkin kokeen alkaessa raaka-ainetta ja olosuhteita vastaamaan. Syöttönopeus oli kaikissa tapauksissa suurin mahdollinen eli 100 m/min. Syöttörullien kuluneisuudesta johtui, että pölkkyt pääsivät joskus pyörähtämään terien mukana, mikä lisäsi puun hävikkiä.

Raaka-aine punnittiin autovaa'alla ennen kokeen alkua kuorimattomana sekä kokeen jälkeen erikseen hakkeena ja kuorintatähteenä. Hakkeesta otettiin näytteitä kosteuden, palakokojakauman ja kuoripitoisuuden määrittämiseksi. Kuorintatähteestä otettiin kosteus- ja puupitoisuusnäytteitä.

6.2.1 Enocellin rumpukuorintakoe lokakuussa 1993

Kokeen puuraaka-aine

Kokeen alkaessa puutavara oli tuoretta mutta jäätynyttä. Hakkuussa pölkkyjen tavoitepituus oli ollut 4,5 m ja vähimmäisläpimitta 7 cm. Pölkyn keskikoko mitattiin eräkohtaisesti 150 pölkyn satunnaisnäytteestä:

Pölkyn mitat	Ensiharvennus- männiköitten kuitupuu	Päätehakkuu- männiköitten kuitupuu
Pituus, m	4,2	3,9
Latvaläpimitta, cm	9,0	10,8

Koe käsitti neljä kooltaan 700 m³:n puutavaraerää:

Erä 1: Yksioteharvesterilla yksin puin karsittua ensiharvennusmäntyä 100%.

Erä 2: Yksioteharvesterilla joukkokarsittua ensiharvennusmäntyä 100%.

Erä 3: Yksioteharvesterilla yksin puin karsittua päätehakkuuleimikon mäntykuitupuuta 90% sekä yksioteharvesterilla yksin puin karsittua ensiharvennusmäntyä 10%.

Erä 4: Yksioteharvesterilla yksin puin karsittua päätehakkuuleimikon mäntykuitupuuta 90% sekä moottorisahalla katkottua karsimatonta ensiharvennusmäntyä 10%.

Raaka-aineen biomassakoostumus

Puutavarasta häviää kuorta korjuun ja kuljetuksen aikana. Kuoripitoisuus säilyy korkeimpana karsimattomassa osapuussa, mutta siinäkin se on alhaisempi kuin pystyvuussa. Yksioteharvesterin karsintalaitteen piikkirullat ja terät irrottavat kuorta, jonka hävikki riippuu karsinnan huolellisuudesta, terien säädöistä sekä vuodenajasta. Seuraava asetelma osoittaa koe-erien kuoripitoisuuden ja kosteuden ennen kokeen alkua.

Raaka-aine	Kuoren osuus rungon kuorellisesta massasta, %	Kuorellisen runkopuun kosteus, %
Ensiharvennusleimikon pystyvuusto	10,1	58,3
Yksin puin karsittu ensiharvennuspuu	7,9	58,6
Joukkokarsittu ensiharvennuspuu	8,5	57,6
Karsimatonta ensi- harvennuspuu	8,9	59,0
Päätehakkuun kuitupuu	6,1	53,0

Ensiharvennusmännyn kuitupuussa kosteus oli lähes sama kuin pystyvuustossa keskimäärin, joten kuivumista ei ollut tapahtunut. Päätehakkuumännikön kuitupuussa kosteus oli alhaisempi, koska päätehakkuupuu sisältää sydänpuuta.

Karsimattoman osapuun oksamassan määrää ei mitattu. Luvun 3.1 mukaan elävästä latvusmassasta jää jäljelle vain kolmannes, kun läpimitaltaan alle 7 cm:n latvakappale jätetään metsään. Lisäksi kuolleista oksista putoilee ainakin kaksi kolmannesta puutavaraa siirreltäessä ja kuljetettaessa. Alkuperäisestä latvusmassasta lienee rumpukuorinnan alkaessa ollut siten jäljellä vajaa kolmannes, jolloin sen kuivamassa lienee runkoon verrattuna ollut 8-10%.

Koejärjestely

Kokeen aikana rummun pyörimisnopeus oli 5,2 rpm, tavoitteellinen täyttöaste 30 % sekä tavoitteellinen tuottavuus 300 m³/h, johon ei aivan ylletty. Ennen rumpu-
tusta puutavaraa sulateltiin syöttökuljettimella vesisuihkulla, jonka lämpötila oli 38°C.

Seoserät syötettiin kuljettimelle siten, että joka kymmenes nosturitaakka koostui ensiharvennumännystä ja muut päätehakkuun mäntykuitupuusta. Tavaralajit sekoittuivat siis rummussa, kuten myös käytännössä tapahtuu.

Tehdasvarastolle saapunut puutavara ja rummutuksessa syntynyt kuorintajäte punnittiin autovaa’alla. Punnitustulokset muunnettiin kosteusnäytteitten kautta kuivamassaksi.

Hakkeen kosteuden, kuoripitoisuuden ja palakokojakauman määrittämistä varten rumpu pysäytettiin kussakin ajossa kahdesti. Kummankin pysäytyksen aikana hakehinnan eri kohdilta otettiin 10 näytettä, kukin kooltaan 10 dm³.

Prosessitähteen puupitoisuus mitattiin 10 dm³:n näytteistä, joita otettiin kustakin erästä 10 kappaletta. Osapuuta ja joukkokarsittua puuta sisältäneistä näytteistä eroteltiin myös oksapuun palaset.

6.2.2 Metsä-Serlan rumpukuorintakoe maaliskuussa 1994

Raaka-aineen biomassakoostumus

Puutavaran keskimääräiset mitat määritettiin 554 pölkyn otantanäytteestä, joka kerättiin siirtämällä kustakin kuorimolle saapuneesta autokuormasta erilleen satunnainen kourataakka. Pölkkyjen keskimääräinen latvaläpimitta oli 10,0 cm ja pituus 4,4 m.

Otantanäytteestä mitattiin myös latvussmassan osuus. Sitä varten näyte punnittiin autovaa’alla, karsittiin sen jälkeen moottorisahalla ja punnittiin lopuksi uudelleen autovaa’alla. Latvussmassasta määritettiin myös kosteus ja neulasten osuus.

Karsimisen ja autopunnitusten jälkeen kustakin koepölkystä sahattiin 3 cm paksu kiekko runkopuun kosteuden ja kuoripitoisuuden määrittämiseksi. Ensimmäinen kiekko sahattiin ensimmäisen pölkyn tyvestä, toinen kiekko 10 cm:n etäisyydeltä toisen pölkyn tyvestä, kolmas kiekko 20 cm:n etäisyydeltä kolmannen pölkyn tyvestä, jatkaen näin pölkky pölkyltä 10 cm:n välein aina 5 m:n pölkyn latvaleyk-
kaukseen saakka. Sarja toistettiin, niin että näytekiekkoja kertyi kaikkiaan 101 kappaletta. Tulokseksi saatiin seuraavat lähtöarvot:

	Raaka-aine ennen rummutusta	
	Osuus kuivamassasta, %	Kosteussuhde, %
Rungon massa:		
Puu	83,4	58,4
Kuori	9,3	59,9
Puu+kuori	92,7	58,6
Latvusmassa:		
Puu+kuori	6,4	..
Neulaset	0,9	..
Puu+kuori+neulaset	7,3	57,8
Kaikki biomassa	100,0	58,5

Luvun 3.1 mukaan ensiharvennusmänniköistä poistettavan puuston latvusmassaosuus on pystypuissa keskimäärin 21,9 % ja 6 cm:n latvaläpimitan täyttävässä rungonosassa 9,9 % kaikesta kuivamassasta. Tämän kokeen raaka-aine sisälsi kuorimolle tullessaan latvusmassaa ainoastaan 7,3 %, sillä vain ohuimmat puut oli jätetty karsimatta, ja niistäkin oli poistettu latva 6 cm:n ohjeläpimitaan.

Rungon kuoripitoisuus oli kuivamassasta laskettuna 10,0%. Leimikkoaineiston mukaan pystypuitten keskimääräinen kuoripitoisuus on ensiharvennusmännikössä 10,1 % ja leimikoitten välinen hajonta 0,9 %. Korjuun aikana kuorta ei siis näytä hävinneen paljoakaan, kun karsinta oli osaksi tehty moottorisahalla ja osaksi jätetty tekemättä.

Koejärjestely

Raaka-ainetta rummutettiin ensin esikokeessa, jolloin seurannan kohteena oli yksinomaan hakkeen laatu. Esikokeen aikana prosessin tuottavuus oli työvuoroittain 89-171 m³/h. Kun tuottavuus oli suurimmillaan, prosessitähteen runsaus aiheutti ongelmia. Normaaliilla kuitupuulla kuorimon tuottavuus on keskimäärin 240 m³/h.

Raaka-aine punnittiin autovaa'alla ennen rummutusta, hake ja prosessitähde erikseen vielä rummutuksen jälkeen. Kokeen aikana otettiin 37 hakenäytettä kosteuden, kuoripitoisuuden ja palakokojakauman määrittämiseksi. Prosessitähteestä otettiin näytteitä vastaavasti kosteuden ja puupitoisuuden määrittämiseksi.

6.2.3 Enocellin rumpukuorintakoe joulukuussa 1994

Kokeen puuraaka-aine

Kaikki puu oli korjattu yksioteharvesterilla. Puutavaran tavoitepituus oli ollut 4,5 m. Todellinen keskipituus oli 4,0 m.

Koesarjassa kuorittiin 6 kooltaan 430-780 m³:n kuitupuuerää, joista 5 oli peräisin ensiharvennusmänniköistä ja verrokki päätehakkuumänniköistä. Ensiharvennus-

erät erosivat toisistaan lähinnä vähimmäisläpimittavaatimuksen suhteen. Erät 4 ja 5 poikkesivat muista siten, että ne olivat peräisin samasta kahtia jaetusta leimikkokokertymästä. Edelliseen oli lajiteltu 9 cm:n latvaläpimitan täyttävät pölkyt ja jälkimmäiseen latvaläpimitaltaan 5-9 cm:n pölkyt.

Kustakin erästä otettiin ennen rummutusta 126-211 pölkyn satunnaisnäyte pölkkytunnusten määrittämiseksi. Ensiharvennusleimikoissa kolme neljänestä puutavaran tilavuudesta koostui tyvipölkkyistä. Päätehakkuuleimikossa tyvipölkkyt muodostivat vain kolmanneksen puutavaran tilavuudesta.

Erä	Leimikkotyyppi	Karsintatapa	Läpimittavaatimus, cm	Latvan läpimitta, cm	Tyvet, % tilavuudesta
0	Päätehakkuu	Yksin puin	7	12,9	36
1	Ensiharvennus	Yksin puin	7	9,0	77
2	Ensiharvennus	Yksin puin	5	9,0	72
3	Ensiharvennus	Joukkona	5	7,2	74
4	Ensiharvennus	Yksin puin	9	11,8	76
5	Ensiharvennus	Yksin puin	5	6,3	51

Raaka-aineen biomassakoostumus

Kuten Uimaharjun rumpukuorinnan ensimmäisessäkin koesarjassa, myös tässä tapauksessa tehtaalle saapuneen kuitupuun kuoripitoisuus oli selvästi alhaisempi kuin pystypuissa. Kuoren kuivamassaosuus oli ensiharvennuspuussa 8 % ja päätehakkuualan kuitupuussa 6 %. Viidennes pystypuuston kuoresta näyttää hävinneen korjuun ja kuljetuksen eri vaiheissa, paljolta harvesterin karsintaterien ja piikkirullien vaikutuksesta.

Ensiharvennuspuun keskimääräinen kosteus oli lähes 60 % eli suurempi kuin pystypuustossa kesäaikaan. Päätehakkuun kuitupuussa kosteus oli 53 % kuten edellisessäkin koesarjassa.

Leimikkotyyppi	Karsintatapa	Läpimittavaatimus, cm	Kuorta, % kuivamassasta	Kuorellisen rungon kosteus, %
Päätehakkuu	Yksin puin	7	5,8	53,0
Ensiharvennus	Yksin puin	7	8,5	59,0
Ensiharvennus	Yksin puin	5	7,1	57,7
Ensiharvennus	Joukkona	5	7,9	63,0
Ensiharvennus	Yksin puin	9	7,8	58,4
Ensiharvennus	Yksin puin	5	7,7	60,4

Joukkokarsinnassa harvesteri jättää jäljelle jonkin verran oksia. Tässä tutkimuksessa oksien osuus oli joukkokarsitussa puutavarassa ennen rumpukuorintaa 1,9 %, joten pystypuuston latvusmassasta oli vielä jäljellä noin 7 %.

Koejärjestely

Kokeen aikana rummun pyörimisnopeus oli 3-4 rpm, tavoitteellinen täyttöaste 30 % ja tavoitteellinen tuottavuus 300 m³/h. Puu oli jäässä, ja kuori sulatettiin lämpötilaltaan 38-50°C vedellä.

Koejärjestely oli sama kuin Uimaharjun ensimmäisessä koesarjassa (luku 6.3.1). Hake- ja tähdenäytteet otettiin ja analysoitiin samalla tavoin. Myös autokuormien punnituksessa noudatettiin samaa menettelyä. Puutavaran ominaisuudet ennen rummutusta määritettiin Äänekoskella käytettyä menetelmää soveltaen (luku 6.3.2).

6.4 Yhdistetty ketjukarsinta-kuorinta ja rumpukuorinta

Kokeen puuraaka-aine

Koesarjassa oli mukana sekä karsimatonta että yksioteharvesterilla karsittua männy- ensiharvennuspuuta. Puutavara oli tuoretta, kuukautta aikaisemmin kaadettua. Tutkimukseen sisältyi 3 mäntyerää, joitten ominaisuudet olivat seuraavat:

Erä	Kasvupaikka	Karsinta-aste	D _{1,3} cm	Pölkyn pituus, m	Kuorta %	Kosteus %
1	Kuiva kangas	Karsittu	10,7	4,1	9,9	56,0
2	Tuore kangas	Karsittu	13,2	4,6	8,3	59,0
3	Tuore kangas	Karsimaton	12,2	5,0	9,8	56,4



Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582

ISBN 951-40-1489-8

ISSN 0358-4283