



FOLIA FORESTALIA

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
HELSINKI 1993

803

Pentti Hakkila & Hannu Kalaja

KETJUKARSINTA ENSIHARVENNUSMÄNNIKÖN KORJUURATKAISUNA
Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine

FOLIA FORESTALIA

Julkaisija — *Publisher*

Metsäntutkimuslaitos
The Finnish Forest Research Institute

Toimitus — *Editors*

Päätoimittaja — <i>Editor in chief:</i>	Erkki Annila
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Seppo Oja
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Tommi Salonen

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland
tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308

Toimituskunta — *Editorial Board*

Erkki Annila (pj. — *chairman*), Pentti Hakkila, Seppo Kaunisto, Jari Kuuluvainen, Juha Lappi, Eino Mälkönen

Tavoitteet ja tarkoitus — *Aim and Scope*

Sarjassa julkaistaan tutkimuksia, tilastoja ja kirjallisuuskatsauksia, joilla on ensisijaisesti kotimaista merkitystä. Julkaisukielenä on kotimainen kieli, mutta julkaisut sisältävät englanninkielisen selosteen tärkeimmistä tutkimustuloksista.

Folia Forestalia publishes research reports, statistics and literature reviews relevant to Finnish forestry.

Tilaukset — *Subscriptions*

Tilaukset ja tiedustelut pyydetään osoittamaan Metsäntutkimuslaitoksen kirjastolle.
Subscriptions and orders for back issues should be addressed to the Library of the Institute.

FOLIA FORESTALIA 803

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1993

Pentti Hakkila & Hannu Kalaja

KETJUKARSINTA ENSIHARVENNUSMÄNNIKÖN KORJUURATKAISUNA

Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine

Approved on 17.3.1993

SISÄLLYS

ESIPUHE

1	KETJUKARSINTAMENETELMÄ	3
1.1	Ketjukarsintamenetelmän kehitys	4
1.2	Peterson Pacific DDC 5000	4
1.3	Menetelmän suomalainen sovellus	5
2	TUTKIMUSAINEISTO	7
3	ENSIHARVENNUSMÄNNIKÖN BIOMASSAKOOSTUMUS	9
4	TÄHTEEN MÄÄRÄ JA KOOSTUMUS	11
4.1	Metsätähde	11
4.2	Prosessitähde	14
5	SELLUHAKKEEN LAATU	15
5.1	Hakkeen palakokojakauma	15
5.2	Hakkeen kuoripitoisuus	17
6	MENETELMÄN RAAKA-AINETASE	18
6.1	Selluhakkeen kertymä	18
6.2	Runkopuun tilavuuden arvioiminen hakemitasta	19
7	TUOTTAVUUS JA KUSTANNUKSET	21
7.1	Karsinta-kuorinta-haketustyön tuottavuus	21
7.2	Ketjujen kestävyys ja kustannukset	23
8	MENETELMÄN SOVELTUVUUS SUOMEN OLOIHIN	26
	KIRJALLISUUS – REFERENCES	28
	SUMMARY	30

Hakkila, P. & Kalaja, H. 1993. Ketjukarsinta ensiharvennumännikön korjuuratkaisuna. Summary: Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine. *Folia Forestalia* 803. 31 p.

Tutkimuksen kohteena oli ensiharvennumännyn korjuu ketjukarsinta-kuorinta-haketustekniikkaa käyttäen. Suomessa kehitetyssä korjuuratkaisussa metsuri kaataa puut moottorisahalla siirtelykaatomenetelmällä. Kuormatraktori katkoo puut kuormauksen yhteydessä 5-m osapuiksi siten, että alle 5–7 cm:n latvaosa jää oksineen metsään. Karsinta, kuorinta ja haketus tehdään amerikkalaisella Peterson Pacific DDC 5000 yksiköllä välivarastolla tai terminaalissa. Koneeseen on tehty Suomen olosuhteitten edellyttämiä muutoksia.

Kun puitten rinnankorkeusläpimitta oli 10–12 cm, hakkuupoistuman maanpäällisestä biomassasta jäi metsätähteeksi 19 % ja prosessitähteeksi terminaalilla 18 %. Selluhakkeen osuus oli 63 % hakkuupoistuman biomassasta ja 86 % sen kuorettomasta runkopuusta. Selluhake täytti sulfaattiprosessin palakokovaatimukset, mutta kuoripitoisuus ylitti erityisesti talvella 1 %:n rajan selvästi. Karsinta-kuorinta-haketustyön tuottavuus oli kolmella eri kuljettajalla terminaalioloissa 10,1–18,5 kuivatonna tehotuntia kohti. Perinteiseen ensiharvennumännyn korjuutekniikkaan verrattuna kuitupuun kertymä kasvaa merkittävästi ja korjuukustannukset alenevat.

Flail delimiting-debarking-chipping techniques were studied in the harvesting of small-sized trees from the first commercial thinning of Scots pine (*Pinus sylvestris*). In the system developed in Finland, trees are felled motor-manually by chainsaw using a felling-piling method. Trees are bucked into approximately 5 m sections and simultaneously topped at a diameter of 5–7 cm, and then subsequently hauled into 4 m-high road-side piles, by a forwarder. Delimiting, debarking and chipping are carried out at a landing site or terminal with a Peterson Pacific DDC 5000 unit, equipped with a feeding table to allow the processing of 5 m sections.

When the breast height diameter was 10–12 cm, 19 % of the above-ground biomass of the logging removal was left as forest residue at the site, and 18 % was left as processing residue at the terminal. Pulp chip recovery was 63 % of the total biomass and 86 % of the bark-free stemwood mass of the initial logging removal. The particle size distribution of chips met the requirements of the sulfate process, whereas the content of bark exceeded the limit of 1 %, especially in the winter. The productivity of three machine operators in the delimiting-debarking-chipping work at the timber terminal was 10.1–18.5 tonnes of dry mass per productive hour. As compared with the traditional log-length system in the early thinning of Scots pine, the recovery of pulpwood increases significantly and costs are reduced.

Keywords: flail delimiting, whole-tree harvesting, first thinning, *Pinus sylvestris*, Scots pine.
FDC 333 + 174.7 *Pinus sylvestris*

Authors' address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Production, Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland.

ISBN 951-40-1288-7
ISSN 0015-5543

Tampere 1993. Tammer-Paino Oy

Esipuhe

Puuntuotantojärjestelmämme kriittinen lenkki on 25–35 vuoden iällä toteutettava ensimmäinen kaupallinen harvennus. Metsiemme ikäluokkajakauma edellyttää ensiharvennushakkuitten lisäämistä, mutta metsäteollisuus on kustannussyistä siirtänyt hakkuitten painopistettä päinvas-toin kohti järeämpiä puustoja. Ensiharvennusleimikot uhkaavat muuttua markkinakelvottomiksi, ellei korjuu- ja kuljetuskustannuksia kyetä supistamaan.

Ratkaisun avainta etsitään pienten puitten joukkokäsittelystä (Sirén 1991). Lupaava vaihtoehto on Pohjois-Amerikassa kehitetty menetelmä, jossa puitten karsinta ja kuorinta tapahtuvat teräsketjuilla piiskaamalla. Karsintaan ja kuorintaan voidaan yhdistää myös haketus.

Pertti Szepaniak Oy, jolla on ainutlaatuinen kokemus hakealan menetelmkehittäjänä ja käytännön yrittäjänä, toi amerikkalaisen karsinta-kuorinta-haketusyksikön syksyllä 1991 Suomeen. Pohjois-Amerikkaan verrattuna menetelmää joudutaan täällä soveltamaan korjuuteknisesti vaikeammassa ja pienipiirteisemmässä oloissa, min-kä vuoksi koneeseen oli tehtävä mittavia muutoksia, ennen kuin se oli valmis käytännön toimiin Enso-Gutzeit Oy:n korjuutyömaililla ja Vuoksenlaakson ja Uimaharjun puutavararasteilla.

Pertti Szepaniak Oy, Enso-Gutzeit Oy ja Imatra Steel Oy:n Loimaan yksikkö käynnistivät yhdessä Metsäntutkimuslaitoksen ja Metsätehon kanssa koe- ja tutkimussarjan menetelmän soveltuvuudesta ja kehitysmahdollisuuksista suomalaisissa ensiharvennuseksikoissa. Tässä yhteistyössä Metsätehon tutkimustoiminnan painopiste on menetelmän tuottavuudessa ja kustannuksissa, kun taas Metsäntutkimuslaitoksen ohjelmassa ovat keskeisessä asemassa menetelmän biomassatase ja raaka-aineen tekniset ominaisuudet. Käsillä oleva julkaisu pohjautuu Metsäntutkimuslaitoksen marraskuun 1991 ja syyskuun 1992 välisenä aikana keräämään aineistoon.

Kirjoittajat ovat kiitollisuudenvelassa toimitusjohtaja Pertti Szepaniakille, joka toisaalta on kantanut riskin ja vastuun kalliin kaluston hankkimisesta ja sen mukauttamisesta uudenlaiseen metsätaloussympäristöön ja toimintakulttuuriin sekä toisaalta aina suhtautunut tavattoman myön-

teisesti kehitystyöhön liittyvään tutkimukseen. Samoin kiitämme Enso-Gutzeit Oy:n Karjalan hankinta-alueen päällikkö Matti Karjulaa, jonka ansiosta uusi menetelmä on voitu ottaa Suomessa käyttöön ennen kaikkia muita Euroopan maita. Hän on myös ideoinut menetelmän kehittäjä ja luonut työmaajärjestelyjen ja muitten toimintojen kautta erinomaiset edellytykset tutkimukselle.

Myös lukuisat muut henkilöt ovat edistäneet ja tukeneet tutkimusta. Enso-Gutzeit Oy:n puolesta ovat arvokasta apua antaneet erityisesti metsätaloussinööri Jukka Huovinen ja työnopastaja Asko Laatikainen kenttätöitten järjestelyssä sekä tekn. lis. Veikko Jokela hakenäytteitten käsitelyssä Tainionkosken tutkimuskeskuksessa. Pertti Szepaniak Oy:n puolesta tutkimukseen osallistuivat Pekka Szepaniak, Timo Szepaniak, Jarmo Rautio ja Erkki Salmi. Piiskausketjujen kehittäjä OFA Oy:ssä (31.12.1992 saakka Imatra Steel Oy) vastasi tehtaanjohtaja Heikki Helminen. Metsät. yo. Pasi Niemeläinen teki runko-puun hukkaa koskevan osaselvityksen professori Pertti Harstelan johdolla Joensuun yliopistossa. Rinnakkaista Metsätehon tutkimusta johti metsänhoitaja P-J. Kuitto.

Metsäntutkimuslaitoksen metsänkasvatuksen tutkimusosaston puolesta kenttätöihin osallistui- vat Tapio Järvinen, Kari Kautto, Juha Metros, Tapio Nevalainen, Erkki Salo ja Veijo Salo. Maija Tuuri ja Essi Puranen hoitivat konekirjoituksen, piirrookset ja toimitustyön taidolla ja kärsivällisesti. Professori Pertti Harstela Joensuun yliopistosta, metsänhoitaja P-J. Kuitto Metsätehosta sekä professori Esko Mikkonen Helsingin yliopistosta tarkastivat käsikirjoituksen ja tekivät lukuisia varteen otettuja parannusesityksiä.

Lausumme kaikille hankkeeseen osallistuneille parhaat kiitoksemme.

Helmikuussa 1993

Pentti Hakkila

Hannu Kalaja

1 Ketjukarsintamenetelmä

1.1 Ketjukarsintamenetelmän kehitys

Piiskaavia teräsketjuja kokeiltiin karsinta- ja kuorintavälineenä ensimmäisen kerran jo 1940-luvulla Yhdysvalloissa. Silloisen tekniikan tasolla menetelmä ei kuitenkaan osoittautunut kilpailukykyiseksi. Kun hakkuutyötä ryhdyttiin 1970-luvulla toden teolla koneellistamaan, tämäkin vaihtoehto otettiin uudelleen esille. Pohjois-Amerikassa ja Uudessa Seelannissa tuli hetkeksi käyttöön laahustraktorin eteen tai taakse kiinnitettyjä ketjukarsintalaitteita, joilla välivarastolle tuotuja puita karsittiin niitten yli rungon suunnassa ajamalla (Cossens 1989). Ruotsissa ketjukarsintaa suorittavia prototyyppilaitteita asennettiin traktorin kuormatilaa ja kokopuuhakkurin eteen (Jonsson 1989, Watson & Twaddle 1990a). Suomessa koneyrittäjä Pertti Szepaniak rakensi 1970-luvun lopussa palstahakkuriin yksirumpuisen ketjukarsijan (Ylä-Hemmilä 1980). Mikään edellä mainituista ratkaisuista ei kuitenkaan jäänyt pysyvään käyttöön.

Viime vuosikymmenen jälkipuoliskolla kehitys johti Yhdysvalloissa entistä monin verroin järeämpiin ketjukarsintayksiköihin, joissa puut kulkeutuvat piiskaavilla ketjuilla varustetun rumpuparin lävitse yksitellen tai joukkona (Baughman ym. 1989, Gingras 1989a ja b, Stephenson 1989). Käsittely voi tähdätä karsintaan, kuorintaan tai samanaikaisesti kumpaankin. Näin toimivia ketjukarsinta-kuorimakoneita valmistavat Yhdysvalloissa ainakin seuraavat yritykset: Manitowoc Engineering Company Wisconsinissa, Peterson Pacific Corporation Oregonissa sekä MacMillan Machine Works Louisianassa. Ensinmainitussa rummut ovat pystyasennossa ja kahdessa jälkimmäisessä vaaka-asennossa. Myös Bruks Mekaniska AB Ruotsissa on rakentanut siirrettävän ketjukarsintalaitteen, mutta se ei ole saavuttanut vakiintunutta asemaa konemarkkinoilla. Suomalaisen metsäkoneteollisuuden tuotevalikoimaan ketjukarsijat eivät toistaiseksi sisälly.

Uudentyyppiset ketjukarsijat tulivat Yhdysvalloissa markkinoille vuonna 1988. Kevääseen 1992 mennessä niitä oli valmistettu jo yli 200 kappaletta. Yhdysvaltain kaakkoisvaltioissa käytetyistä kuitupuusta karsittiin ja kuorittiin vuonna 1991 tällä menetelmällä 2 %. Pääosa koneista vain karsii ja kuorii, mutta monesti ne liittyvät työketjuun, johon kuuluu myös erillinen hakkuri ja

jonka päätuotteena on siis kuoreton selluhake. Viime aikoina on tullut käyttöön myös yhdistelmiä, joissa sama yhden miehen käyttämä kone suorittaa niin karsinnan, kuorinnan kuin hakeuksenkin.

Ketjukarsintamenetelmillä on suuri potentiaali nuorten metsien harvennushakkuissa, ja ne kehittyvät Yhdysvalloissa ja Kanadassa edelleen ripeästi (Edman 1989, Twaddle ym. 1989, Watson 1992). Pohjois-Amerikan ulkopuolelle ketjukarsijoita on toimitettu esimerkiksi Australiaan, Japaniin, Venäjälle sekä useaan Etelä-Amerikan maahan (Watson 1992). Euroopassa oli syksyllä 1992 vasta kaksi yksikköä: yksi Ranskassa (Wood Supply Research Group 1991) ja yksi Suomessa.

1.2 Peterson Pacific DDC 5000

Peterson Pacific DDC 5000 on ohjaamalla varustetun telialustaisen puoliperävaunun päälle rakennettu *karsinta-kuorinta-haketusyksikkö*. Vakiovarusteisena sen massa on 36 t, pituus 11,3 m, leveys 3,0 m, kuljetuskorkeus ohjaamo alas laskestuna 4,1 m sekä maavara 25 cm. Se on varustettu 515 kW:n Cummins KTTA 19-P-700 dieselmoottorilla, valmistajan omalla karsinta-kuorintalaitteella, Precision laikkahakkurilla ja Prentice 180 C nivelpuomikuormaimella, jonka ulottuvuus on 7,6 m ja kääntökulma 340°. Kesäkuuhun 1992 mennessä valmistaja oli myynyt kaikkiaan 16 yksikköä (Favreau 1992).

Ketjukarsintalaitte sijaitsee perässä ohjaamon alapuolella. Puut saatetaan kuormaimella ylä- ja alasyöttöruullien väliin, mistä ne kulkeutuvat 58 x 122 cm:n syöttöaukon kautta edelleen kahden vaakasuuntaisen karsinta-kuorintarummun piiskattaviksi. Tässä tutkimuksessa käytetyillä rummuilla ketjut sijaitsivat 6 rivissä, kussakin 9 tai 10 ketjua, niin että piiskaavien ketjujen kokonaisuus oli 111 kappaletta. Syöttönopeus on 38 m/min ja piiskaavien rumpujen pyörimisnopeus 525–626 rpm. Oksa- ja kuorijäte poistetaan rumpujen alapuolelta koneen sivulle hydraulisynterintä työntämällä kolalla, jonka toimintasykli on 10 s.

Kuorettomiksi piiskatut rungot jatkavat syöttöruullien ajamina kolmiteräiseen *laikkahakkuriin*, jonka pyörimisnopeus on 600 rpm. Lämpimäl-

taan 168 cm:n laikan yhteydessä on erottelija, joka estää runkojen mukana irrallisina kulkeutuvia puun ja kuoren palasia ohittamasta laikkaa ja siten pääsemästä selluhakkeen joukkoon. Näin eroteltava hylkyjäte purkautuu hakkurin sivulle omaan kasaansa.

Pertti Szepaniak Oy toi vakiovarusteisen Peterson Pacific DDC 5000 yksikön syksyllä 1991 Suomeen. Ratkaisu on alunperin tarkoitettu runkojuontoon perustuvan kuuman korjuuketjun yhteyteen suomalaista ensiharvennusmäntyä järeämmille puille, eikä se siten sellaisenaan sovellu pienikokoisen katkaistun puutavaran käsittelyyn. Teleskooppimainen hakeputki on suunniteltu täyttämään puoliperävaunua amerikkalaisen käytännön mukaisesti perästä eikä yläpuolelta. Siksi koneen perään lisättiin viisimetrisille puunosille mitoitettu syöttöpöytä, ja hakeputki muutettiin täysperävaunullista kuljetuskalustoa silmällä pitäen kuormatilaa yläpuolelta purkavaksi. Näin varustettuna yksikön kokonaisuudessa on vetoauto mukaan luettuna 52 t.

Koneen hankintahinta liikevaihtoveroineen oli syksyllä 1991 Suomeen tuotuna 2 232 000 markkaa. Lisäksi muutokset ovat maksaneet suunnittelu mukaan lukien 300 000 mk. Kun vielä otetaan huomioon siirtelyyn tarvittavan käytetyn kuorma-auton hinta 320 000 mk, on yksikön kokonaiskustannus 2 852 000 mk. Valuuttakurssien muutosten vuoksi hinta olisi vuoden 1993 tilanteesta merkittävästi korkeampi.

1.3 Menetelmän suomalainen sovellus

Jo 1970-luvun alussa pienpuun hyväksikäytön ongelmaan ryhdyttiin etsimään ratkaisua *kokopuuhaaketukseen perustuvasta teknologiasta*, jossa selluhake erotetaan energijakeesta vasta haketuksen jälkeen. Epäpuhtauksien erottaminen hakkeesta on kuitenkin osoittautunut hyvin vaikeaksi. Kokopuuhaakkeen kuoripitoisuus voidaan kyllä puhdistaa sulfaattimassateollisuuden vaatimusten mukaiseksi, mutta ongelmina ovat suuri puunhukka ja kuidutukseen tarkoitetun puuaineen hiertyminen tulitikkumaiseksi neulahakkeeksi. Riittämätön kapasiteetti on aiheuttanut lajittelulaitoksissa ylivoimaisia kustannusongelmia (Hakkila 1989). Kokopuuhaakkeen puhdistustekniikkaa kehitellään kyllä edelleen (Seppänen ym. 1992), mutta niin Yhdysvalloissa, Kanadassa, Ruotsissa kuin Suomessakin metsäteollisuuden kiinnostuksen painopiste on siirtynyt prosessiratkaisuihin, joissa energiaraaka-aine erotetaan kuituraaka-aineesta ennen haketustapahuttamaa.

Enso-Gutzeit Oy soveltaa *ketjukarsinta-kuorinta-haketuskoneita* ensiharvennusmäntäköissä. Nyt käytössä olevassa korjuuketjussa metsurin tehtävänä on lähinnä vain puitten kaato. Kuljetustraktorin kuormaustyötä helpottaakseen metsuri kuitenkin samalla ohjaa puita suuntausta ja siirtelykaadon tekniikkaa hyväksi käyttäen kasamuodostelmiin. Siirtely rajoittuu puihin, joitten rinnankorkeusläpimitta on alle 12,5 cm. Osa metsureista käyttää moottorisahassaan kaatokehikkoa, joka mahdollistaa työskentelyn selkään suorana. Puut jätetään karsimatta, mutta perinteisen tavaralajimenetelmän mukaisesti ne katkaistaan joko kaatotyön yhteydessä moottorisahalla tai metsätraktorin kuormauksen yhteydessä kourasahalla noin viisimetrisiksi puunosiksi. Metsämaan ravinnetasapainon varjelemiseksi ja hakkeen laadun parantamiseksi 5–7 cm ohuempi latvaosa jätetään samalla tähteenä metsään. Kuljetus kannolta tienvarsipinoihin tehdään vakiovarusteisella kuormatraktorilla. Tästä korjuumenetelmästä käytetään nimitystä *osapuunakuorma*.

Osapuuraaka-aine karsitaan, kuoritaan ja haketetaan Peterson Pacific DDC 5000 yksiköllä, jonka asemapaikkana Enso-Gutzeit Oy:n kehitämässä korjuujärjestelmässä on joko metsäpään välivarasto tai Vuoksenlaakson tai Uimaharjun puutavaraterminaali (kuva 1). Välivarasto- ja terminaalityöskentelyn keskinäinen edullisuus riippuu vallitsevista olosuhteista. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa raaka-aine kuljetetaan keskusasemalle karsimattomana perävaunullisella puutavarakuorma-autolla. Ulos työntyvien oksien esteeksi auto varustetaan aluminista tai metalliverkosta rakennetuilla kevyillä sivulaidoilla, mutta tiivistyslaitteita ei käytetä (kuva 2). Kuormakapasiteetin vajaakäytön vuoksi kaukokuljetuskustannukset nousevat terminaalivevaihtoehdossa karsimatonta osapuuta kuljetettaessa korkeammiksi kuin välivarastovaihtoehdossa haketta kuljetettaessa, mutta kuuman ketjun organisatoriset häiriöt vältetään, huolto ja hakkeen laaduntarkkailu helpottuvat, koneitten toiminnallinen käyttöaste kasvaa ja prosessitähteen hyödyntäminen energiakäytössä helpottuu ratkaisevasti. Menetelmäkehittelyssä päähuomio on toistaiseksi kiinnitetty kuituteollisuudelle kelvolliseen puhtaaseen hakkeeseen, kun taas oksa- ja kuoritähteen hyödyntäminen etsii vielä ratkaisuaan.

Amerikkalaisessa kuumassa korjuujärjestelmässä puut juonnetaan laahustraktorilla välivarastolle kokonaisina prosessin edistymisen myötä ja syötetään karsinta-kuorinta-haketuskoneeseen kuormaimen vetoliikkeellä. Suomalaisessa järjestelmässä taas viisimetrisistä osapuista koos-



Kuva 1. Peterson Pacific DDC 5000 ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikkö Enso-Gutzeit Oy:n Vuoksenlaakson puutavaravarastolla.
Figure 1. Peterson Pacific DDC 5000 flail delimeter-debarker-chipper at the Vuoksenlaakso timber terminal of Enso-Gutzeit Oy.



Kuva 2. Osapuun kuljetukseen varustettu puutavara-auto.
Figure 2. A timber truck equipped for the transport of 5 m tree sections.

tuva taakka siirretään koneen perässä sijaitsevalle syöttöpöydälle etukäteen tehdyiltä korkeilta varastopinoilta. Koneita joudutaan tällöin aika

ajoin siirtämään varastopinon suunnassa, ja taakkaa joudutaan kääntämään 90°, mikä hidastaa kuljettajan työskentelyä.

2 Tutkimusaineisto

Tutkimuksen kohteena olevassa kehittämishankkeessa on kysymys uuden teknologian siirrosta Pohjois-Amerikasta Suomeen. Siirtoon liittyy myös syvälinen laite- ja menetelmäkehittelyn elementti, sillä metsätalouden ja koko yhteiskunnan puunkäytölle asettamat odotukset samoin kuin puunkorjuun olosuhteet ovat Suomessa verrattomasti vaativammat. Samalla hankkeessa on mukana vahva tutkimuselementti, jossa Metsätehon ja Metsäntutkimuslaitoksen yhteistyönä arvioidaan menetelmän teknistä, taloudellista, organisatorista ja ekologista soveltuvuutta ensiharvennusmänniköitten korjuuratkaisuksi ja etsitään osviittaa menetelmän edelleen kehittämiseksi.

Hankkeen kehitysluonteesta johtuen aineisto koostuu useista peräkkäisistä kenttäkokeista ja mittauksista, joista osa on jo menettänyt kiinnostavuutensa menetelmän kehittymisen myötä. Seuraavassa kuvataan lyhyesti niitä osa-aineistoja, joihin tämä Metsäntutkimuslaitoksen raportti perustuu.

Puuston biomassakoostumus

Ensiharvennusmänniköitten biomassakoostumuksesta on käytettävissä Metsäntutkimuslaitoksen aikaisempia selvityksiä (Kanninen ym. 1979, Hakkila 1991). Menetelmän raaka-ainetaseen ja vaihtoehtoisten korjuuratkaisujen ympäristövaikutusten arvioimiseksi tehtiin kuitenkin syyskesällä 1992 täydentäviä mittauksia Itä-Suomessa kolmessa Enso-Gutzeit Oy:n osoittamassa leimikossa, joista kustakin analysoitiin 10 poistettavaa puuta. Tavanomaisten tunnusten lisäksi niistä mitattiin punnitsemalla paksuudeltaan alle 5 cm:n rungonosa ja erikseen siitä karsittu latvusmassa, 5–7 cm:n rungonosa ja siitä karsittu latvusmassa sekä yli 7 cm:n rungonosasta karsittu latvusmassa. Kuivat oksat jätettiin vähäisen merkityksensä vuoksi punnituksista pois.

Koko rungon kuivamassa määritettiin mäntyrunkojen kuivapainotaulukoitten avulla (Hakkila 1979). Muitten biomassakomponenttien kuivamassa saatiin punnitustuloksista kosteusnäytteitä hyväksi käyttäen.

Metsätähde

Edellä mainituista kolmesta leimikosta mitattiin myös metsätähteen todellinen määrä sen jälkeen, kun karsimaton osapuoli kuljetettu kuormatraktorilla tien varteen. Metsään jätettyjen latvojen keskimääräinen tyviläpimitta oli noin 7 cm.

Metsätähteen määrä mitattiin kussakin leimikossa ajourien poikki vinottain suunnatuilta arviointilinjoilta 20 yhden aarin ympyräkoelalta. Kuorellinen runkopuu, runkopuuhun kiinnittyneet oksat sekä irralliset tuoret oksat punnittiin ympyräkoeloittain. Jos latvus sijaitsi koelalla vain osaksi, siitä punnittiin koalan sisäpuolelle langennut osa. Irrallisia kuolleita oksia ei punnittu. Tuorepainot muunnettiin kuivapainoiksi kosteusnäytteillä, joista määritettiin myös neulasten osuus kuivamassasta.

Runkopuun poistuman laskemiseksi ympyräkoeloilta määritettiin myös kaadettujen puitten kantoläpimitat.

Prosessitähde

Karsinta-kuorinta-haketuskäsitelyssä syntyvän prosessitähteen määrää seurattiin Vuoksenlaakson puutavaravarastolla. Mittauksen kohteina olivat syöttöpöytäähde, karsinta-kuorintalaitteen piiskaustähde, hakkurin separaattoritähde sekä talteen saatu selluhake. Ositteista selvitettiin kokonaisuudessaan lisäksi myös kuorettoman runkopuun osuus. Mittaus tapahtui jälleen punnitsemalla, ja tulokset muunnettiin kuivamassaksi kosteusnäytteitten avulla. Karsimatonta osapuuta käsiteltiin seurannan aikana helmi-maaliskuussa 1992 yhteensä 161 t ja kesäkuussa 1992 yhteensä 184 t kuivamassana.

Runkopuun hävikki

Sen lisäksi mitä edellä on kerrottu prosessitähteen yhteydessä, erillisellä 50 m³:n aineistolla selvitettiin puun hävikin riippuvuutta rungon koosta. Puut lajiteltiin ennen prosessia neljään

rinnankorkeusläpimittaluokkaan: alle 5 cm, 6–10 cm, 11–15 cm sekä 16–20 cm. Kukin luokka jaettiin edelleen kolmeen erään, joista yhdessä puut otettiin talteen kokonaisuudessaan, toisessa latva poistettiin 5 cm:n läpimittaa myöten ja kolmannessa 7 cm:n läpimittaa myöten. Eristä määritettiin hukkarunkopuun osuus kiinnittäen huomiota erityisesti piiskauksessa katkeileviin latvoihin. Tämän osa-aineiston on kuvannut tarkemmin Niemeläinen (1992).

Hakkeen palakoko ja kuoripitoisuus

Hakkeen palakokojakauman ja kuoripitoisuuden seuranta tapahtui pääasiassa helmi-maaliskuussa 1992, jolloin lämpötila vaihteli +6 asteen ja –18 asteen välillä. Aineistoon sisältyi 63 hakekuormaa, joista kustakin tutkittiin yksi kuivamassaltaan 800–900 g:n hakenäyte. Seurannan kohteena oli myös terien kunnan vaikutus hakkeen palakokoon. Tutkimusjakson aikana hakkurin terät vaihdettiin viidesti, ja kutakin näytettä otettaessa tiedettiin, kuinka paljon haketta teräsarjan kunnostuksen jälkeen jo oli tuotettu.

Puun koon vaikutus hakkeen palakokojakaumaan ja kuoripitoisuuteen selvitettiin aineistosta, jossa oli mukana 466 puuta, runkotilavuudeltaan yhteensä 19 m³. Nämä puut jaettiin edellä jo kuvattuun tapaan neljään läpimittaluokkaan, ja lisäksi viides lajittelemattomien puitten luokka käsiteltiin sekakokoisena. Kussakin luokassa erotettiin jälleen 3 erää, joista yhdessä latvus oli mukana kokonaisuudessaan, toisessa puun latvakappale oli poistettu kahden ja kolmannessa neljän cm:n läpimitasta alkaen. Jokaisesta erästä tutkittiin hakkeen palakokojakauma ja kuoripitoisuus.

Palakokojakauma mitattiin seuraavalla seula-sarjalla: 45 mm:n reikäseula, 8 mm:n rakoseula, 13 mm:n reikäseula, 7 mm:n reikäseula ja 3 mm:n reikäseula. Kuoripitoisuus määritettiin painosuutena selluhakkeen kuivamassasta. Keskimääräisten pitoisuuksien lisäksi kuoren osuus mitattiin 16 näytteestä seulontajakeittain.

Työn tuottavuus

Metsäteho suoritti vuoden 1992 aikana menetelmän tuottavuutta ja kustannuksia koskevan laajan tutkimuksen (Kuitto & Rieppo 1992). Metsäntutkimuslaitoksen tuotostutkimus rajoittui Vuoksenlaakson puutavaravarastolle, missä karsinta-kuorinta-haketussyksikön tehoajan menek-

ki mitattiin 165 autokuormasta. Osassa aineistoa työ ositettiin havainnointimenetelmää käyttäen 7 eri toimintoon sekä keskeytyksiin. Osasta kuorimia merkittiin muistiin myös syötettyjen taakkojen lukumäärä sekä hakkurin tyhjänäpyörimisaika. Tutkimuksen aikana koneen käyttäjinä vuorotteli kolme kuljettajaa.

Ketjujen kulutus

Kehitysohjelman tavoitteena on myös pidentää ketjujen ikää materiaalivalinnan, valmistustekniikan sekä asemoinnin keinoin. Vakiovalmistaisen ketjun rinnalla tutkittiin neljää uutta koeketjutyyppeä, jotka poikkesivat toisistaan teräksen koostumuksen, karkaisun ja päästökäsittelyn suhteen. Sekä ylä- että alarummulla varattiin vakiovalmistaiselle ketjutyypille kaksi ja kullekin koeketjutyypille yksi rummun laidasta laitaan ulottuva 9 tai 10 ketjun rivi, jolloin kulumista voitiin seurata yhdenmukaisissa oloissa. Kaikki ketjut olivat OFA Oy:n valmistamia.

Kokeen alkaessa ketjuista mitattiin jokaisen lenkin pituus sekä vahvuus molemmissa päissä, joissa kuluminen lähinnä tapahtuu. Ketjutyypin tunnistettiin värimerkkien ja asemansa perusteella, niin että peräkkäiset mittatiedot olivat kohdennettavissa. Jokaisen työpäivän päättyessä laskettiin puuttuvien lenkkien määrä ja mitattiin kunkin ketjun neljän uloimman lenkin paksaus kummastakin päästä, mikäli asianomainen lenkki oli vielä jäljellä. Kokeen aikana valmistettiin 713 kuivatonna haketta, mihin mennessä ketjuista oli jo hävinnyt siinä määrin lenkkejä, että kuorintatulos oli alkanut vakavasti kärsiä. Kokeen päättyessä aloitusvaiheen mittaukset uusittiin. Kadonneet lenkit etsittiin piiskaustahteesta Puolustusvoimain miinaharavalla.

Koko aineisto

Kuten edellä on todettu, tutkimus koostuu useasta erillisestä osasta, joitten tavoitteet ja ajoittuminen eivät aina mahdollistaneet samaan aineistoon turvautumista. Kokonaisuudessaan aineiston määrä oli seuraava:

- Puuston biomassakoostumus tutkittiin 3 leimikosta, joista kussakin analysoitiin 10 kaadettua koepuuta.
- Metsätähteen määrä ja koostumus mitattiin kolmesta leimikosta, joista kussakin tutkittiin 20 yhden aarin koealaa.
- Prosessitähteen määrä mitattiin kahdesta osapuuerästä,

joitten kokonaiskuivamassa oli 345 t. Talteen saadun hakkeen kuivamassa oli 268 t.

- Runkopuun hävikin riippuvuus puun rinnankorkeusläpimitasta selvitettiin aineistosta, jossa runkopuun kokonaismäärä oli 50 m³ eli 18,5 t kuivamassana.
- Hakkeen palakokojakauma ja kuoripitoisuus määritettiin aineistosta, jonka suuruus oli 503 kuivattonnia

eli 63 hakekuormaa. Kustakin autokuormasta analysoitiin yksi hakenäyte.

- Karsinta-kuorinta-haketustyön tuotos määritettiin 1381 kuivattonnin eli 165 autokuorman aineistosta.
- Piiskausketjujen kulutuksen seuranta-aikana tuotettiin haketta 713 kuivattonnia eli 84 autokuormaa.

3 Ensiharvennusmännikön biomassakoostumus

Metsäntutkimuslaitoksen, Metsätehon ja Jaakko Pöyry Oy:n tutkimuksessa harvennushakkuitten taloudellisesta merkityksestä ja toteuttamisvaihtoehdoista arvioidaan, että maassamme on 2,23 milj. ha *ensiharvennussvaiheen saavuttaneita nuoria metsiä*, joissa puuston runkoluku ylittää Metsäkeskus Tapion harvennusmallien mukaisen runkolukukriteerin. Puuston keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan alarajaksi on tuolloin asetettu 8 cm ja ylärajaksi 12 cm sekä keskipituuden ylärajaksi 13 m. Kun runkopuun vähimmäiskertymäksi edellytetään 20 m³/ha, tämän vaatimattoman korjuukelpoisuuskynnyksen ylittää edellä mainitusta pinta-alasta enää 0,96 milj. ha. Korjuukypsiens ensiharvennusleimikoitten pinta-ala kasvaa lähivuosina nopeasti (Harvennushakkuitten... 1992).

Suuri osa ensiharvennusleimikoista on männiköitä. Kuluvan vuosikymmenen puolivälissä kaikesta hakkuusuunnitteen mukaisesta puutavarasta tulisi korjata ensiharvennusmänniköistä Etelä-Suomessa 6 % ja Pohjois-Suomesta 8 % (Imponen ym. 1992).

Metsäteollisuus on alentanut korjuukustannuksiaan yksioiteharvestereitten käyttöönottolla. Ensiharvennusleimikoissa, joista poistettava puusto on liian pientä hakkuukoneilla yksin puin käsiteltäväksi, kustannussäästöjä ei ole kuitenkaan tällä keinolla juurikaan saavutettu. Perinteistä karsittua kuitupuuta valmistettaessa ensiharvennusmännyn korjuukustannus kannolta tien varteen on sekä kone- että metsurityönä moninkertainen päätehakkuualan konehakkuukustannuksiin nähden.

Kustannusongelman lieventämiseksi on ehdotettu uutta kasvatustallia, jossa sekä taimikon harvennusta että kaupallista ensiharvennusta myöhäistetään kuitupuun järeyttämiseksi ja hakkuukertymän paisuttamiseksi. Ensiharvennus

suositellaan toteutettavaksi vastaisuudessa vasta puuston saavuttaessa 13 m:n pituuden (Harvennushakkuitten... 1992), mutta lähivuosina ensiharvennuskohteet säilyvät kehitystaustastaan johdun lähes nykyisen kaltaisina. Kuitupuun vähimmäislatvaläpimitan nostaminen 7 cm:iin on kuitenkin nostanut myös ensiharvennusleimikoista poistettavan rungon keskitilavuuden Etelä-Suomessa 0,070 ja Pohjois-Suomessakin 0,045 m³:iin (Imponen ym. 1992), mutta samalla se on kaventanut leimikkokohtaista kertymää.

Tässä tilanteessa puitten *korjuu oksineen ja joukkokäsittely* ovat varteenotettava ratkaisuvaihtoehto ensiharvennushakkuille. Silloin karsimistapahtuma siirtyy ainakin osaksi pois kasvupaikalta. Rungon ohella saadaan talteen myös latvussmassaa, jonka suhteellinen osuus puuston biomassasta on suurin juuri ensiharvennusleimikoissa. Tämä selittyy poistettavien puitten pienellä koolla, suurella latvussuhteella sekä nuorille puille ominaisella runsaalla neulasmassalla. Erityisesti männikössä on ensiharvennussvaiheessa lisäksi jäljellä paljon kuolleita oksia, kun latvusto on sulkeutunut vasta äskettäin eivätkä kuivuneet oksat ole vielä ennättäneet karsiutua.

Metsäntutkimuslaitoksen aikaisemmassa laajassa tutkimuksessa *elävien oksien kuivamassa* oli Etelä-Suomen ensiharvennusmänniköistä poistettavissa puissa rungon kuivamassaan verrattuna 27,0 % ja kuolleitten oksien kuivamassa vastaavasti 7,3 % (taulukko 1). Poistettavien puitten keskimääräinen rinnankorkeusläpimita oli tuolloin alle 9 cm. Käsillä olevassa tutkimuksessa oli elävien oksien osuus 30 puun otoksessa vain 21,9 %. Ero selittyy osaksi joskaan ei kokonaan sillä, että tutkimusmetsiköitten runkoluku oli säilynyt ensiharvennussvaiheeseen saakka suurena ja että poistettavien puitten keskimääräinen rinnankorkeusläpimita oli nyt 11 cm.

Taulukko 1. Etelä-Suomen ensiharvennusleimikoista poistettavan puuston maanpäällisen osan kuivamassan koostumus (Hakkila 1991).

Table 1. Composition of the above-ground biomass of trees removed in the first thinning of Scots pine in southern Finland (Hakkila 1991). Dry mass basis.

Biomassakomponentti <i>Biomass component</i>	Verrattuna rungon massaan <i>Compared to stem mass</i>	Verrattuna kaikkeen biomassaan <i>Compared to all biomass</i>
	Osuus, % – Proportion, %	
Neulaset – <i>Foliage</i>	9,1	6,8
Elävien oksien kuori – <i>Bark in live branches</i>	6,6	4,9
Elävien oksien puuaines – <i>Wood in live branches</i>	11,3	8,4
Elävät oksat yhteensä – <i>Live branches, total</i>	27,0	20,1
Kuolleet oksat – <i>Dead branches</i>	7,3	5,4
Kaikki latvusmassa – <i>Crown mass total</i>	34,3	25,5
Rungon kuori ja puuaines – <i>Wood and bark in stem</i>	100,0	74,5
Maanpäällinen biomassa – <i>Above-ground biomass</i>	134,3	100,0

Taulukko 2. Metsätähteen kuivamassa kolmella ensiharvennustyömaalla. Kuorellisen runko-puun hakkuukertymä työmaittain 72 m³/ha, 93 m³/ha ja 62 m³/ha.

Table 2. Dry mass of stem and crown residue at three different thinning sites of Scots pine. Stemwood recovery, including bark, 72 m³/ha, 93 m³/ha and 62 m³/ha respectively.

Biomassan komponentti <i>Biomass component</i>	Työmaa 1 <i>Site 1</i>	Työmaa 2 <i>Site 2</i>	Työmaa 3 <i>Site 3</i>	Keskimäärin <i>Average</i>
	Metsätähde, t/ha – <i>Forest residue, t/ha</i>			
Irralliset oksat <i>Loose branches</i>	0,55	0,60	1,28	0,81
Latvan oksat <i>Branches in stem top</i>	2,18	3,60	3,07	2,95
Latvusmassa yhteensä <i>Branches, total</i>	2,73	4,20	4,35	3,76
Runkopuu kuorineen <i>Stemwood and bark</i>	2,53	3,65	2,84	3,01
Tähde yhteensä <i>Residue, total</i>	5,26	7,85	7,19	6,77
Neulaset – <i>Foliage</i>	1,08	1,39	1,50	1,32
Oksapuu kuorineen <i>Branchwood and bark</i>	1,65	2,81	2,85	2,44
Runkopuu kuorineen <i>Stemwood and bark</i>	2,53	3,65	2,84	3,01
Tähde yhteensä <i>Residue, total</i>	5,26	7,85	7,19	6,77
	Metsätähteen osuus, % – <i>Forest residue, %</i>			
Elävästä latvuksesta <i>Of live crown mass</i>	43,0	49,1	75,5	55,9
Rungosta – <i>Of stem mass</i>	8,5	9,3	10,8	9,5
Kaikesta biomassasta <i>Of all biomass</i>	14,6	16,5	18,0	16,4

4 Tähteen määrä ja koostumus

4.1 Metsätähte

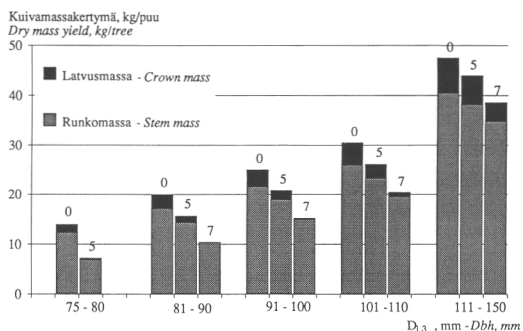
Silloinkin kun puut korjataan oksineen osapuun menetelmää käyttäen, osa biomassasta jää aina metsään. Tämä tapahtuu osin tarkoituksetta mutta usein myös tarkoituksella, jotta talteen saatavan raaka-aineen puupitoisuus kasvaisi, ajoneuvojen tilankäyttö tehostuisi ja metsämaan ravinnemenetykset supistuisivat. Tavoite riippuu myös biomassan energiakäyttömahdollisuuksista.

Elävä latvus kattaa etelä-suomalaisessa ensiharvennuskäytössä keskimäärin 57 % puun koko pituudesta (Hakkila 1991). Rungon tyvipäässä sen alapuolella on vielä runsaasti kuivia oksia, mutta kun ne katkeilevat puuta kaadettaessa ja siirreltäessä, niiden merkitys on kuitupuun korjuussa vähäinen.

Enso-Gutzeit Oy:n noudattamassa korjuujärjestelmässä puun latvaosa jätetään metsään. Nimellinen katkaisuläpimitta on joko 5 tai 7 cm. Tähdettä jää tuolloin eniten pienimmistä puista, ei ainoastaan suhteellisesti vaan myös absoluuttisesti, sillä ensiharvennuskäytössä rungon latva kapenee vallitun latvuskerroksen puissa hitaimmin (kuva 3). Seuraavan, rinnankorkeusläpimitaltaan 10 cm:n mäntyä edustavan asetelman mukaan elävät oksat jäävät lähes kokonaisuudessaan latvakappaleeseen, jos katkaisuläpimitta on 7 cm:

	Latvan katkaisuläpimitta	
	5 cm	7 cm
Elävistä oksista	42	89
Rungosta	5	15
Kaikesta biomassasta	11	28

Käytännössä latva katkaistaan yleensä taakamuodostelmassa joukkokäsittelynä. Taulukko 2 osoittaa tähteen todellisen määrän kolmessa ensiharvennusleimikossa, joissa latvan keskimääräinen katkaisuläpimitta oli ensimmäisessä 6,8 cm, toisessa 7,5 cm ja kolmannessa 6,6 cm. Kaikilla työmailla katkaisun teki kuormatraktorin kuljettaja taakasta kourasahalla. Kolmannella työmailla metsuri karsi oksikkaimpia puita autokul-



Kuva 3. Erikokoisista ensiharvennuskäytössä osapuun menetelmällä talteen saatava runko- ja latvusmassa latvan katkaisuläpimitan ollessa 0, 5 tai 7 cm. Kuivat oksat eivät ole mukana.

Figure 3. Stem and crown mass recovery from Scots pine trees of different sizes in the first commercial thinning. Tree section method, topping diameter 0 or 5 or 7 cm. Dead branches excluded.

jetuksen tilankäytön tehostamiseksi, minkä vuoksi hakkuualalle jäi karsimattomien latvojen lisäksi runsaasti myös irrallisia oksia.

Metsään jääneen tähteen määrä oli kuivamassana keskimäärin 6,8 t/ha, josta kuorellisen runkopuun osuus oli 3,0 t/ha ja tähteeksi jääneen latvusmassan 3,8 t/ha. Huomattakoon, että kuorellisen runkopuun kertymä oli tämän tutkimuksen työmailla peräti 76 m³/ha, kun se Etelä-Suomen ensiharvennusleimikoissa on keskimäärin vain 42 m³/ha (Imponen ym. 1992). Näin siis myös tähteen määrä oli tavanomaista suurempi.

Taulukon 2 mukaan metsään jäi tähteeksi keskimäärin 10 % rungon, 56 % latvuksen sekä 16 % puun koko maanpäällisen osan biomassasta. Tällöin ei ole lainkaan otettu huomioon kooltaan alamittaisesta puusta mahdollisesti kertyvää lisätähdettä. Voidaan päätellä, että osapuun menetelmän aiheuttamat metsämaan ravinne- ja puuston tuotostappiot eivät voi käytännössä olla läheskään niin vakavia kuin sellaisissa järjestetyissä kenttäkokeissa, joissa harvennusaloilta on tarkoin poistettu kaikki hakkuutähte.



Kuva 4. Ensiharvennusmänniköstä korjattua 5-m osapuuta välivarastolla (kuva Arto Rummukainen).
Figure 4. Five-meter tree-sections from the first commercial thinning of Scots pine at a landing site (photo Arto Rummukainen).



Kuva 5. Syöttötähte koostuu elävistä ja kuolleista oksista.
Figure 5. Infeed residue is composed of live and dead branches.



Kuva 6. Piiskaustähde koostuu lähinnä oksa- ja kuorimurskeesta. Runkopuun osuus on noin 3 %.
Figure 6. Flail residue is composed mainly of branches and bark. The proportion of stemwood is about 3 %.



Kuva 7. Separattoritähteessä on 80 % puuta ja 20 % kuorta.
Figure 7. Separator residue contains 80 % stemwood and 20 % bark.

4.2 Prosessitähde

Kun taakka asetetaan kuormaimella karsinta-kuorinta-haketus koneen syöttöpöydälle pakkosyöttörullien otteeseen, se hajoaa ja siitä putoaa irronneita oksia ja kuoriainesta pöydän ympäristöön (kuvat 4 ja 5). Tämä *syöttötähde* koostuu lähes yksinomaan oksista, ja niistäkin valtaosa on kuivia. Talvikaudella syöttötähteen sekaan joutuu myös lunta. Tässä tutkimuksessa syöttötähteen osuus oli 3,2 % prosessorille syötetystä biomassasta.

Kulkiessaan varstan tavoin piiskaavan rumpuparin välistä puut karsiutuvat ja kuoriutuvat. Syntyvä *piiskaustähde*, jota hydraulisynterintön tämä kola purkaa koneen sivulle, koostuu lähinnä oksa- ja kuorimurskeesta (kuva 6). Lisäksi se sisältää rungosta irronneita puusäleitä ja tikkuja sekä murtuneita latvapätkiä, jotka ovat usein liian suuria polttokattilan syöttölaitteilla sellaisenaan käsiteltäviksi. Puilla, joitten latvaa ei oltu katkaistu metsässä, runko murtui kahdessa eri kokeessa keskimäärin 35 ja 36 mm:n läpimitasta, suurimmilla puilla kuitenkin yleensä paksummasta kohdasta kuin pienimmillä (Niemeläinen 1992). Piiskaustähdeksi joutui kaikkiaan 15,9 % prosessorin käsittelemästä biomassasta.

Piiskauksen jälkeen puutavara etenee syöttörullien työntämänä laikkahakkuriin. Laikkaa ympäröivä suojakaulus estää ennen aikaisesti irronneitten palasten pääsyn selluhakkeen joukkoon, kun piiskauksessa repeytyntä mutta rungossa vielä osaksi kiinni olevaa kuorta ja säleityntä puuainesta irtoilee haketuksen vaikutuksesta ja putoaa laikan edessä olevaan tähdeloukkuun. Näin erottuva *separaattoritähde* purkaantuu omalle kasalleen hakkurin sivulle (kuva 7). Separattoritähteen puupitoisuus on huomattavan korkea, 80 %, mutta se koostuu repeilleistä ja suikalemaisista tikuista, jotka ovat sellun keittoon kelvottomia. Koska vaippapinnan suhteellinen merkitys supistuu puitten järeytyessä, separattoritähteen osuus on suurin pienillä puilla. Keskimäärin joutui separattoritähdeksi 3–4 % biomassasta.

Prosessin päätuote, *selluhake*, koostuu hakkurin terien leikkaamista ja laikan läpäisseistä hakepalloista. Selluhakkeeseen joutuu olosuhteista riippuen enemmän tai vähemmän myös kuoriainesta sekä palakooltaan keittoon sopimattomia kappaleita.

Karsinta-kuorinta-haketus käsittelyyn ohjatus taakka-aineesta saatiin 77,5 % talteen seulomattomana selluhakkeena. Muu osa jäi prosessitähdeksi, jonka kertymää voidaan haluttaessa

Taulukko 3. Runkopuun hukka ensiharvennumännyn kesäaikaisessa karsinta-kuorinta-haketusprosessissa. Osapuuraaka-aineen vähimmäisläpimita 7 cm.

Table 3. Loss of stemwood in the delimiting-debarking-chipping process of Scots pine from first thinning in summertime. Minimum top diameter of tree sections 7 cm.

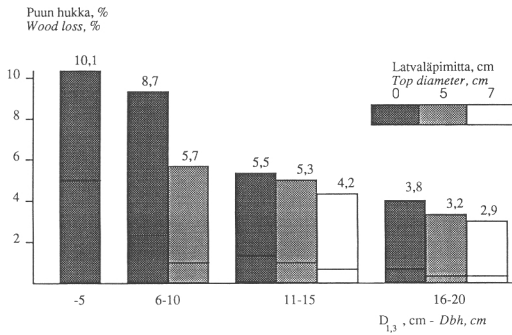
Tähteen lähde <i>Source of residue</i>	Osuus biomassasta <i>Proportion of biomass</i>	Puupitoisuus <i>Wood content %</i>	Osuus runkopuusta <i>Proportion of stemwood</i>
Syöttötähde <i>Infeed residue</i>	3,2	0,0	0,0
Piiskaustähde <i>Flail residue</i>	15,9	3,2	0,5
Separattoritähde <i>Separator residue</i>	3,6	79,9	2,8
Prosessitähde yhteensä <i>Process residue, total</i>	22,7	14,5	3,3

kasvattaa korjaamalla puut latvoineen. Tuolloin kuitenkin prosessikustannus saattaa nousta, hakkeen laatu kärsiä ja metsämaan ravinnevaroihin kohdistuva rasitus kasvaa.

Prosessitähteen osuus riippuu myös puitten koosta. Tämän osoittaa Yhdysvalloissa kokonaisilla karsimattomilla loblollymännillä (*Pinus taeda*) tehty vertaileva koe, jossa seulomattoman selluhakkeen saanto oli rinnankorkeusläpimitaluokassa 7,5 cm 58 %, läpimitaluokassa 12,5 cm 61 % ja tukkipuilla 70 % sisään syötetystä biomassasta (Watson 1992).

Niin kauan kuin prosessitähdeellä ei ole energiakäyttöä, sen kokonaisuus määrää enemmän merkitsee joukkoon joutuva kuidutuskelpoinen runkopuu, jota ei saisi päästä prosessitähteen joukkoon. Kun puun latva jätetään metsään, prosessitähdeeseen sekoittuu vain vähän runkopuuta. *Runkopuun prosessihävikki* oli kesäaikaisessa seurannassa keskimäärin 3,3 %, josta pääosa kerääntyi separattoritähdeeseen (taulukko 3). Puun hukkaa voitaisiin supistaa nykyistäkin pienemmäksi luopumalla hakkurin erottelijasta, mutta tuolloin selluhakkeen laatu kärsisi kohtuuttomasti.

Runkopuun hävikkiin vaikuttavat muun muassa puulaji, puun koko, latvaleikkauksen läpimita, lämpötila sekä piiskauskäsittelyn voimakkuus ja kesto. Käsillä olevassa tutkimuksessa selvitettiin sen riippuvuutta rungon koosta ja latvan katkaisuläpimitasta, jonka vaihtoehtoina olivat joko latvan talteenotto kokonaisuudessaan tai sen katkaiseminen 5 tai 7 cm:stä. Maaliskuussa 1992



Kuva 8. Runkopuun hukka ketjukarsinta-kuorinta-hakeuskäsittelyssä puun rinnankorkeusläpimitasta ja latvan katkaisuläpimitasta riippuen. Ylempänä separaattoritähde, alempana piiskaustähde.

Figure 8. Stemwood loss in the delimiting-debarking-chipping process of small-sized Scots pine trees as a function of breast height diameter and topping diameter. Separator residue above, flail residue below.

tehdyssä kokeessa runkopuun hävikki oli rinnankorkeusläpimitaltaan 8 cm:n puilla 5 ja 7 cm:n katkaisuläpimitalla 5,8 ja 5,4 %. Rinnan- korkeusläpimitan noustessa 12 cm:iin hävikki oli 5,2 ja 4,7 % vastaavasti. Se siis supistui puun koon ja vähimmäislatvaläpimitan kasvaessa, kuten seuraava yhtälö ja kuva 8 (Niemiäinen 1992) osoittavat:

$$y = 10,92 - 0,374D - 1,281L_5 - 1,587L_7 \quad R^2 = 0,83$$

y = Runkohukkapuun osuus, %

D = Rinnan- korkeusläpimita, cm

L₅ = saa arvon 1 latvan katkaisuläpimitan ollessa 5 cm, muutoin 0

L₇ = saa arvon 1 latvan katkaisuläpimitan ollessa 7 cm, muutoin 0

	Kesäkuussa	Helmi-maaliskuussa
	Kuiva-ainetta, %	

Syöttötähde	79,8	45,7
Piiskaustähde	56,6	43,6
Separattoritähde	52,4	41,1

Keskimäärin	59,2	43,4
-------------	------	------

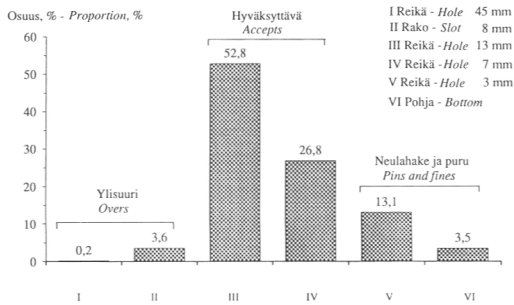
5 Selluhakkeen laatu

5.1 Hakkeen palakokojakauma

Sulfaattiprosessin tasainen ja häiriötön kulku edellyttää, että hakepalaset täyttävät tietyt paksuus- ja pituusvaatimukset, ovat leikkuupinnoiltaan eheitä ja pakkautuvat hyvin autokuormassa ja keitossa. Tavoitteimat riippuvat tehtaan prosessitekniikasta, mutta edullisin hakepalan paksuus on yleensä 1,5–4 mm ja pituus 15–25 mm. Palan leveyden merkitys on pienempi, mutta paksuuttaan kapeammaksi pilkkoutunutta neulaha-

ketta ei saisi olla enempää kuin 10–12 %, sillä runsaampana se aiheuttaa tukkeumia ja estää nestevirtauksia. Hienojakoinen puru aiheuttaa ongelmia katkenneitten kuitujen ja epätasaisen keittymisen muodossa (Hartler & Stade 1979).

Enso-Gutzeit Oy:n vaatimusten mukaan hyväksyttäviä ovat hakepalat, jotka läpäisevät ensin pituusseulonnassa 45 mm:n reikäseulan ja paksuusseulonnassa 8 mm:n rakoseulan mutta eivät läpäise 7 mm:n reikäseulaa. Tällaisten hakepalasten osuuden tulee olla vähintään 80 %



Kuva 9. Eri seulontajakeitten keskimääräinen osuus helmi-maaliskuussa 1992 tehdyssä selluhakkeessa.
Figure 9. Average proportion of different screening fractions in pulp chips in February and March 1992.

hakkeen kuivamassasta.

Palakoon seuranta tutkimuksessa valmistettiin 8930 i-m³ haketta yhteensä neljällä teräsarjalla. Laikkahakkurin terät oli säädetty ääriasentoonsa 25 mm:n nimellispuuudelle. Helmi-maaliskuussa 1992 kerättyä 63 autokuorman aineistoa edustava kuva 9 osoittaa, että kokovaatimukset täyttävän hakkeen osuus oli keskimäärin 79,6 %. Ylisuurta haketta oli vain vähän mutta alamittaista neulahaketta ja purua yhteensä 16,6 %, mikä tulos on yhdenmukainen Peterson Pacific DDC 5000 karsija-kuorija-hakettajasta Kanadassa julkaistujen tulosten kanssa (Favreau 1992). Hienojakeitten osuuden supistaminen edellyttäisi hakkurin terävälkyksen suurentamista, mutta laikan rakenne ei anna siihen mahdollisuutta.

Vastoin odotuksia, terien kunnan ei voitu osoittaa vaikuttavan palakokojakaumaan, vaikka teräsarjaa kohti valmistettiin yli 2000 i-m³ haketta. Mutta esimerkiksi Kanadassa on todettu terien tylstymisen johtavan hienojakeen osuuden kasvuun niin nopeasti, että terien vaihtoa suositel-

Taulukko 4. Lämpötilan vaikutus selluhakkeen palakokojakaumaan helmi-maaliskuussa 1992.

Table 4. The effect of temperature on the particle size of pulp chips in February and March 1992.

Lämpötila, °C Temperature, °C	Ylisuuri Overs	Hyväksyttävä Accepts	Neulahake ja puru Pins and fines	Yhteensä Total
	Osuus, % - Proportion, %			
+1 - +5	4,6	81,8	13,6	100,0
-5 - -11	3,3	77,1	19,6	100,0
-18	2,4	75,3	22,3	100,0

laan siellä 10 autokuorman välein (Perrier 1990). On kuitenkin huomattava, että Kanadassa puut tuodaan metsästä laahustaakkoina, jolloin niihin kertyy hiekkaa ja muita epäpuhtauksia enemmän kuin suomalaisessa korjuujärjestelmässä. Tässä tutkimuksessa terien tylstymisen vaikutus saattoi peittyä lämpötilan muutosten alle, sillä suoja- ja pakkasen vuorottelivat seurantajakson aikana. Jäättyessään puu haurastuu, jolloin neulahakkeen ja purun määrät kasvavat. Hyväksyttävän hakkeen osuus putosikin 75 %:iin lämpötilassa -18°C, vaikka se suoja- ja pakkasen vuorottelulla oli 82 % (taulukko 4).

Hakkeen palakoko riippuu myös rungon läpimitasta. Vaatimusten vastaisia paloja syntyi tässä tapauksessa eniten pienistä rungoista. Alamittaisten 5-6 cm:n runkojen ongelmat eivät rajoitu yksinomaan korkeisiin korjuukustannuksiin, puun hukkaan ja keuhon kuorintatulokseen, vaan haittana on lisäksi hakkeen epäedullinen palakokojakauma (taulukko 5).

Vertailuna todettakoon, että Yhdysvaltain etelävaltioista kerättyssä laajassa aineistossa keltamännyn metsähakkeesta oli keskimäärin 72 % hyväksyttävää, vain 2,5 % alamittaista mutta peräti 25,5 % paksuudeltaan yli 8 mm. Purua ja neulahaketta oli vähemmän kuin vastaavilla teräaseteilla tehdasvarastossa tehdyssä hakkeessa, mikä otaksuttiin puun tuoreuden ansioksi. Paksuja paloja taas oli liikaa, minkä syyksi katsottiin puutteelliset säädöt ja terähuolto (Watson & Twaddle 1990b, Watson ym. 1991a ja b). Ylisuurten palojen runsaus suomalaisiin tuloksiin verrattuna saattaa ainakin pieneltä osalta selittyä sillä, että Yhdysvalloissa käsitellään keskimäärin järeämpiä puita, joihin piiskauksessa jääneistä oksantyngeistä syntyy paksuja hakepaloja.

Taulukko 5. Puun rinnankorkeusläpimitan vaikutus selluhakkeen palakokojakaumaan helmi-maaliskuussa 1992.

Table 5. The effect of the breast height diameter of trees on the particle size distribution of pulp chips in February and March 1992.

D _{1,3} , cm Dbh, cm	Ylisuuri Overs	Hyväksyttävä Accepts	Neulahake ja puru Pins and fines	Yhteensä Total
	Osuus, % - Proportion, %			
4 - 5	9,6	72,5	17,9	100,0
6 - 10	8,4	77,6	14,0	100,0
11 - 15	5,0	79,7	15,3	100,0
16 - 20	4,6	80,8	14,6	100,0
Seka - Mixed	6,0	78,9	15,1	100,0

5.2 Hakkeen kuoripitoisuus

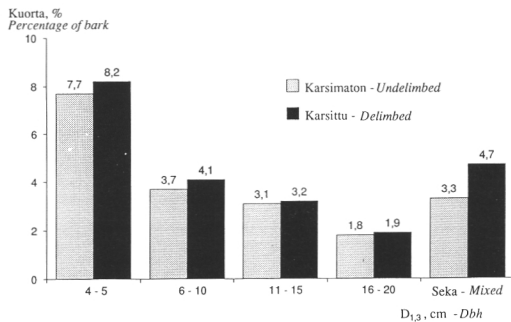
Sulfaattiselluteollisuudessa hakkeen kuoripitoisuus ei saisi olla yleensä enempää kuin 1 % kuivamassasta. Tämä raja asetetaan myös ketju-karsinta-kuorintamenetelmällä tuotettavalle kuitupuulle. Pienikokoisen ensiharvennuspuiden kuorintaminen on kuitenkin erityisen ongelmallista ja tavoitteen saavuttaminen vaikeata millä tahansa teknisellä ratkaisulla. *Ketjukuorinnan tulos* riippuu sekä raaka-aineen ominaisuuksista että prosessiteknisistä tekijöistä (Sauder & Sinclair 1989):

- *Puulajien välillä* on suuria eroja. Havupuilla päästään parempaan tulokseen kuin lehtipuilla.
- *Pienissä puissa* on suhteellisesti enemmän kuorta ja vaippapintaa kuin suurissa. Niihin pyrkii jäämään enemmän kuorta.
- Jos *syöttötaakka* on liian suuri, puut suojaavat toisinaan piiskauksen tehoa vaimentaen. Kooltaan 0,10–0,15 m³:n havupuita saisi olla taakassa vain 3 tai 4.
- Puitten tulee kulkeutua *piiskaukseen vaakatasossa* eikä kaltevassa asennossa, jottei tyvi nouse alarummun ketjujen ulottumattomiin. Tästä ei kuitenkaan aiheudu ongelmaa suomalaisessa menetelmässä, jossa koneeseen jälkikäteen lisätty pöytä varmistaa vaakasuuntaisen syötön.
- Kuoriutuminen riippuu myös *syöttönopeudesta*. Hidas syöttö merkitsee pitkää viipymää ja saa ketjut myötäilemään rungon pintaa kiinteämmin, jolloin kuorintatulos kohentuu.
- *Oksat hidastavat* erityisesti pienten puitten kulkua piiskausrumpujen välistä, minkä vuoksi piiskausaika kasvaa ja kuorintatulos saattaa itse asiassa kohentua oksikkuuden kasvaessa.

- *Rumpujen kierrosnopeuden* kasvu merkitsee myös kuorintatehon kasvua, mutta samalla myös ketjujen kuluminen ja murtuminen nopeutuvat. Ketjujen lyhentyessä ne menettävät piiskaustehoa.
- *Rungon jäätyessä* kuori kiinnittyy puuaineeseen entistä lujemmin. Siksi kuorinta vaikeutuu kovalla pakkasella.

Yhdysvalloissa lukuisilta työmailta kerättyissä näytteissä mäntyhakkeen kuoripitoisuus oli ennen vuotta 1990 keskimäärin 2,2 %. Sen jälkeen koneytäjät ovat oppineet hallitsemaan prosessin paremmin ja saavuttavat tavoitellun 1 %:n kuoripitoisuuden yhä useammin. Talviaikana, jolloin kuori on sulassakin puussa kiinni lujemmin kuin kesällä, kuorinnan laatua voidaan parantaa ripustamalla ainakin osaan rummun kiinnityspisteistä ylimääräinen rinnakkainen ketju (Watson ym. 1991a ja b, Watson 1992).

Käsillä olevassa tutkimuksessa *kuoripitoisuutta seurattiin* Vuoksenlaakson puutavaravara-astolla helmi-maaliskuussa 1991 yhteensä 37 auto-kuormasta. Tavanomaisten kahdeksan-lenkkisten ketjujen sijasta oli tuolloin käytössä poikkeuksellisesti seitsemän-lenkkinen ketjusarja, mikä mitä todennäköisimmin heikensi kuorinnan tulosta. Kun lämpötila pysytteli välillä +3°C ja –13°C, hakkeen kuoripitoisuus oli keskimäärin 3,3 %, mutta lämpötilassa –18°C se nousi 4,4 %:iin. Samalla koneityypillä Kanadassa tehdyssä kokeessa hakkeen kuoripitoisuus oli tuoreella puulla 2,8 % ja jäätyneellä 3,2 % (Evaluation... 1990). Käsillä olevan tutkimuksen huonompi kuorintatulos aiheutunee osittain myös siitä, että meillä ovat kysymyksessä pienemmät puut, jot-



Kuva 10. Karsitusta ja karsimattomasta männystä tehdyn selluhakkeen kuoripitoisuus puun rinnankorkeusläpimitasta riippuen helmi-maaliskuussa 1992.

Figure 10. Percentage of bark in pulp chips made from undelimited and delimited Scots pine as a function of breast height diameter in February and March 1992.

Taulukko 6. Selluhakkeen kuoripitoisuus seulontajakeittain kesäkuussa 1992.

Table 6. Bark content of pulp chips by screening fraction in June 1992.

Seula - Screen	Kuoripitoisuus Proportion of bark	Jakein osuus Proportion of fraction %
Reikä - Hole 45 mm	0,10	1,3
Rako - Slot 8 mm	0,97	8,8
Reikä - Hole 13 mm	0,83	57,2
Reikä - Hole 7 mm	1,82	23,8
Reikä - Hole 3 mm	2,42	8,0
Pohja - Bottom	12,77	0,9
Kaikki - All	1,15	100,0
Hyväksyttävä - Accepts	1,07	81,0

ka on lisäksi katkottu viisimetrisiksi pätkiksi. Ketjujen iskujen vauhdittamana katkottu puutavara kulkeutuu piiskauksen läpi nopeammin kuin kokonaiset puut ainakin syötön alkuvaiheessa, ennen kuin taakka törmää hakkurin laikkaan. Suppea koe kahdeksanlenkkisillä ketjuilla viittasi kuitenkin Suomessakin kesäaikana selvästi parempaan kuorintatulokseen.

Myös puun läpimitta vaikutti hakkeen kuoripitoisuuteen. Rinnankorkeusläpimitaltaan 5 cm:n puilla kuorintatulos ei ollut tyydyttävä, joten ne eivät sovellu kuitupuuksi tältäkin kannalta. Tasakokoisilla puilla päästään parempaan piiskaus-

tulokseen kuin runkokooltaan epätasaisella taakalla. Karsinta-kuorinta-haketuskoneseen syötettävään taakkaan tulisi siis mahdollisuuksien mukaan valita samansuuruisia puita (kuva 10).

Osa piiskauksessa jäljelle jääneestä kuoresta murenee haketuksessa, minkä seurauksena kuorta kasaantuu hakkeen puru- ja neulajakeisiin. Kun tämä hienoaines poistetaan seulomalla, hakkeen keskimääräinen kuoripitoisuus alenee hieman. Taulukon 6 esimerkkitapauksessa kaiken hakkeen keskimääräinen kuoripitoisuus oli ennen seulontaa 1,15 % ja seulonnan jälkeen 1,07 %.

6 Menetelmän raaka-ainetase

6.1 Selluhakkeen kertymä

Korjuuorganisaation tehtävänä on toimittaa puutavara käyttöpaikalle laadukkaana ja edullisin kustannuksin. Puu on pyrittävä ottamaan tarkoin talteen, mutta toisaalta ei kuitenkaan tule vaarantaa metsämaan ravinnetasapainoa korjaamalla kaikki biomassaa pois ravinneköyhiltäkin kasvupaikoilta.

Ensiharvennushakkuun päätuote on kuitupuuta, joksi on kelpollista vain rungon puuaine. Niin kauan kuin kuorella ja latvusmassalla ei ole arvoa polttoaineena, korjuujärjestelmän tehokkuus punnitaan vain kertyvän selluhakkeen kustannusten, määrän ja laadun sekä toisaalta jäljelle jäävän metsikön tilan perusteella. Tulevaisuudessa yhteiskunta joutuu asettamaan suuremman painon uusiutuvalle metsäenergialle sen kansantaloudellisten ja ympäristöetujen vuoksi, ja silloin myös muitten biomassakomponenttien talteenoton merkitys kasvaa (Hakkila 1992).

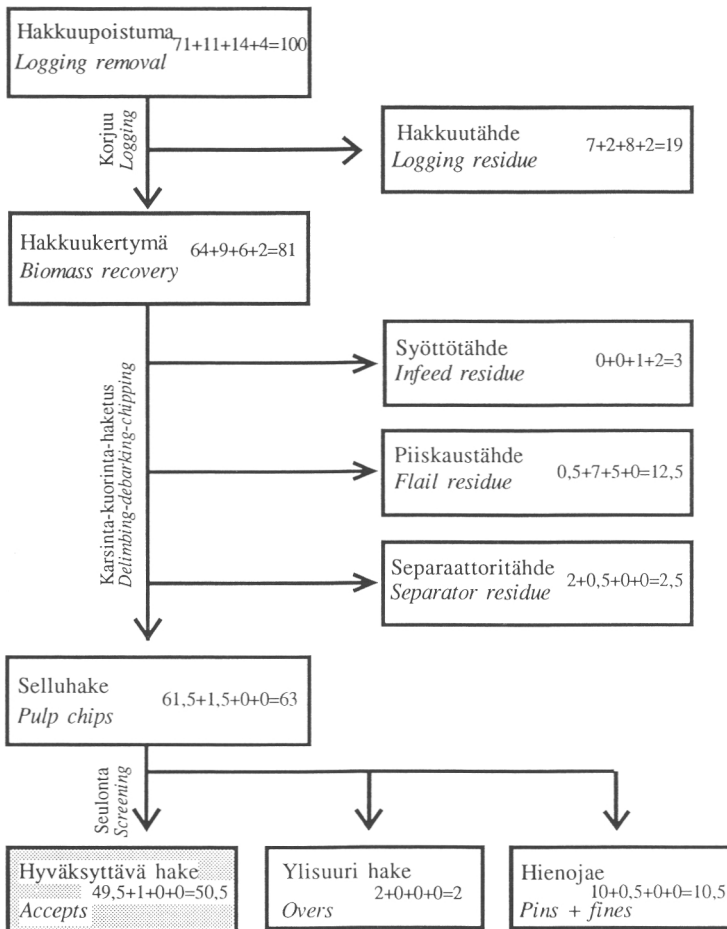
Alamittaisuuden vuoksi korjuukelvottomien puitten määrä leimikossa vaihtelee edeltäneen taimikonhoidon tasosta ja ajankohdasta riippuen niin laajoissa rajoissa, että niiden sisällyttäminen *ensiharvennusleimikon raaka-ainetaseen* laskelmiin vaikeuttaisi tulosten yleistettävyyttä. Siksi rinnankorkeusläpimitaltaan alle 8 cm:n puut rajataan tässä tarkastelun ulkopuolelle. Rajan yläpuolellakin runkopuun ja latvusmassan kertymäosuudet kasvavat puun koon myötä, joten tulos riippuu puuston järeydestä. Kuvat 11 ja 12 edustavat ensiharvennuskäynnin, josta poistettavien puitten rinnankorkeusläpimitta on 10–12 cm ja latvan katkaisuläpimitta 7 cm.

Kun laskennan lähtökohtana on siis rinnankorkeudella 8 cm:n läpimitan täyttävä poistettava puusto, on kertymä tienvärsipinoon 81 % hakuu-poistuman kaikesta maanpäällisestä biomassasta ja 90 % sen kuorettomasta runkopuusta. Karsinta-kuorinta-haketus käsittelyssä tästä raaka-aineesta saadaan latvusmassan lisäksi *erilleen* 85–90 % rungon kuoresta, mutta samalla hukkaantuu tähteen mukaan myös 3–5 % käsiteltävästä runkopuusta. Näin saadaan hakeauton talteen seulomattomana selluhakkeena lopulta 63 % leimikosta poistetun puuston maanpäällisestä biomassasta ja 86 % sen kuorettomasta runkopuusta.

Loblollymänty (*Pinus taeda*) edustava tutkimustulos Yhdysvalloista osoittaa läpimitan voimakkaan vaikutuksen kertymään (Watson 1992). Puun koko huomioon ottaen Enso-Gutzeit Oy:n korjuujärjestelmä näyttää johtavan sekä selluhakkeen kokonaiskertymän että palakooltaan hyväksyttävän hakkeen kertymän suhteen edullisempaan tulokseen kuin Yhdysvalloissa käytössä oleva järjestelmä, jossa puut tuodaan väli-varastolle kokonaisissa laahustaakoissa.

	Puun d _{1,3} , cm	Talteen saatu selluhake	Hyväksytty selluhake
Osuus poistuman biomassasta, %			
Loblollymänty USA:ssa	7,5	57,8	35,1
Loblollymänty USA:ssa	12,5	60,8	42,2
Loblollymänty USA:ssa	17,5	62,2	46,7
Loblollymänty USA:ssa	22,5	67,2	52,1
Mänty Suomessa	8–15	63,0	49,5

Biomassan kulku - Biomass flow



Osalukujen selitys:

Runkopuu + Runkon kuori + Elävät oksat + Kuivat oksat = Kokonaismassa

Explanation for the numbers:

Stemwood + Stem bark + Live branches + Dead branches = Total mass

Kuva 11. Ensiharvennusmänniköstä poistetun puuston biomassan kulku ja kertymä ketjukarsinta-kuorinta-haketusmekaniikkaan perustuvassa korjuujärjestelmässä. Puun rinnankorkeusläpimitta vähintään 8 cm, latvan katkaisuläpimitta 7 cm.

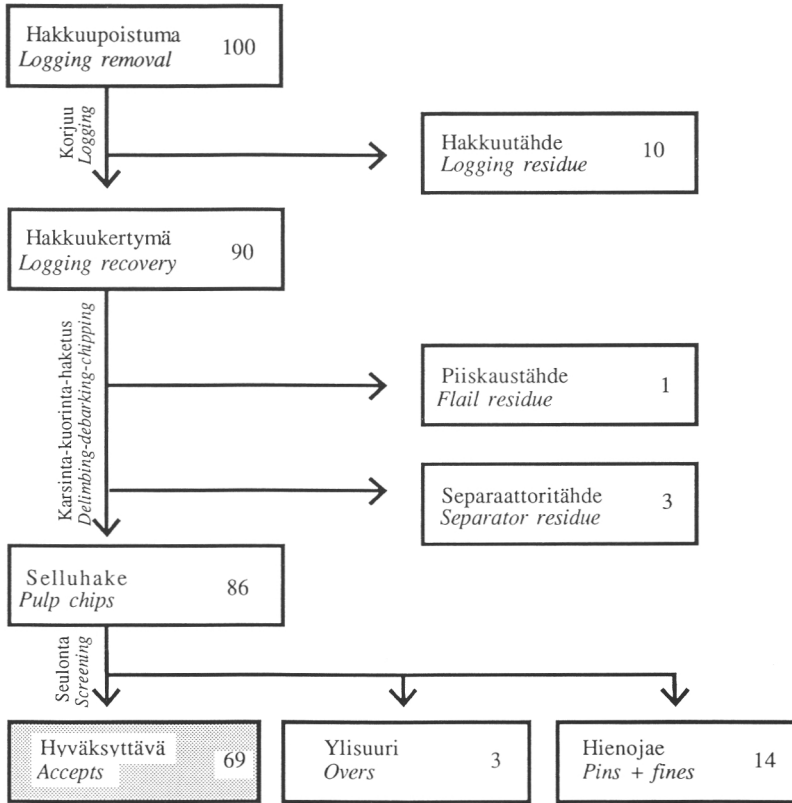
Figure 11. The flow and yield of above-ground biomass from the first thinning of Scots pine stands in a logging system based on the use of delimiting-debarking-chipping techniques. Minimum dbh of tree 8 cm, topping diameter 7 cm.

6.2 Runkopuun tilavuuden arvioiminen hakemitasta

Pienikokoisen ensiharvennuspuiden mittaaminen on työlästä ja kallista. Se on erityisen hankalaa osapuomenetelmässä, kun puita ei karsita ja puutavaran

pitäisyys vaihtelee. Eräs mahdollisuus on johtaa luovutus- ja työmitta varten tarvittava kuorellisen runkopuun kiintotilavuus muuntoluvuilla hakemitasta, joka voidaan määrittää irtotilavuutena, tuoremassana tai kuivamassana.

Ensiharvennusleimikosta saatavan mäntypuun



Kuva 12. Ensiharvennusmänniköstä poistetun kuorettoman runkopuun kulku ja kertymä ketjukarsinta-kuorinta-haketustekniikkaan perustuvassa korjuujärjestelmässä. Puun rinnankorkeusläpimitta vähintään 8 cm, latvan katkaisuläpimitta 7 cm.

Figure 12. The flow and yield of stemwood, bark excluded, from the first thinning of Scots pine stands in a logging system based on the use of delimiting-debarking-chipping techniques. Minimum dbh of tree 8 cm, topping diameter 7 cm.

puuaineen keskimääräiseksi kuivatuoretiheydeksi oletetaan tässä aikaisempien tutkimusten perusteella 370 kg/m^3 (Hakkila 1979). Jos hakekuormasta määritetään tehtaalla kuivapaino, tällä kuivatuoretiheyden tarjoamalla muuntoluvulla voidaan laskea selluhakkeen kiintotilavuus auto-kuormassa. Kuva 11 puolestaan osoittaa, että karsinta-kuorinta-haketuskäsittelyssä on saatu selluhakkeena talteen keskimäärin 63/73 eli 86,3 % osapuupinon kuorellisesta runkopuusta. Kuivamassaan perustuva kiintotilavuuden laskentame-

nettely on silloin seuraava, kun laskentaesimerkissä perävaunullisen auton hakekuorman tilavuudeksi on mitattu välivarastolla ennen kuljetusta $98,2 \text{ i-m}^3$ ja kuivamassaksi tehdasvarastolla 15,55 t:

Hakekuormaa vastaavan pinon kuorellisen runkopuun tilavuus (m^3) =

$$\frac{15,55}{0,370 \cdot 0,863} = 3,13 \cdot 15,55 = 48,7$$

Jos kuorellisen runkopuun tilavuus halutaan laskea hakkeen irtotilavuuden perusteella, on tunnettava lisäksi hakkeen tiiviyys. Metsähakkeen tiiviyteen vaikuttavat aikaisempien tutkimusten mukaan erityisesti seuraavat tekijät (Hakkila 1989):

- *Hakepalan muoto.* Kun hakepalan paksuus suhteessa palan litteän sivun pinta-alaan kasvaa, myös hakkeen tiiviyys kasvaa.
- *Palakoon tasaisuus.* Kooltaan epätasaiset hakepalat täyttävät tehokkaimmin toistensa välisiä tiloja, joten viher- ja kuoriaines sekä muu hienojae lisäävät hakkeen tiiviyttä. Jos puro ja neulahake seulotaan pois, tiiviyys alenee.
- *Puulaji.* Kevyestä ja hauraasta puuaineksesta syntyy haketuksessa eniten hienoainesta, mikä lisää hakkeen tiiviyttä. Siten pienikokoisesta karsimattomasta puusta laikkahakkurilla tehdyn kokopuuhakkeen tiiviyys on ennen kuljetusta koivulla 0,377, männyllä 0,403 ja harmaalepällä 0,457 (Kanninen ym. 1979).
- *Lämpötila.* Jäätäneestä puusta syntyy enemmän hienoainesta kuin sulasta puusta. Pakkasella tehty hake on siis tiivistä, mutta toisaalta se painuu kuljetuksen aikana tavanomaista vähemmän.
- *Hakkeen kuormaustapa.* Puhaltamalla kuormattu hake asettuu tiiviimpään kuin kuljettimelta, siilosta tai kippavalta lavalta pudotettu hake. Mitä suuremmalla voimalla hake sinkoutuu hakkurin torvesta kuormaan, sitä tiiviimpään se asettuu.
- *Painuma.* Hakkeen tiiviyys kasvaa kuljetuksessa. Pääosa painumasta tapahtuu jo ensimmäisen 20 km:n aikana, erityisesti kun alkumatka joudutaan yleensä ajamaan tien huonokuntoisimmalla osalla. Painuma on suurin hakkeessa, joka on kuormattu ilman puhallusvoimaa ja jossa on runsaasti hienoainesta. Mäntypuisen kokopuuhakkeen tiiviyys oli eräässä suurehossa aineistossa ennen kuljetusta 0,41 ja kuljetuksen jälkeen 0,44 (Hakkila 1984).

Tässä tutkimuksessa *hakkeen kuivamassa* oli kuormakohtaisesti ennen kuljetusta suuressa 134 autokuorman aineistossa talvella $152,3 \pm 7,9$ kg/i-m³ ja suppeassa 7 autokuorman aineistossa kesällä $162,2 \pm 7,7$ kg/i-m³. Hakkeen tiiviyys oli vastaavasti talvella $0,412 \pm 0,021$ ja kesällä $0,438 \pm 0,021$, jolloin siis ei ollut tapahtunut kuljetuksen aiheuttamaa painumista. Runkopuun tilavuus lasketaan esimerkkitapauksessa seuraavasti, kun hakkeen keskimääräiseksi tiiviydeksi oletetaan 0,428:

Hakekuormaa vastaavan pinon kuorellisen runkopuun tilavuus (m³) =

$$\frac{0,428 \cdot 98,2}{0,863} = 0,496 \cdot 98,2 = 48,7$$

Samalla periaatteella voidaan kuvien 11 ja 12 tietojen pohjalta arvioida vaikkapa kaadetun puuston koko biomassa tai korjatun runkopuun kuoreton tilavuus. Mikäli tällaisia muuntolukuja ryhdytään soveltamaan käytännön mittaustehtävissä, tarvitaan kuitenkin tarkentavia, asianomaisia olosuhteita vastaavia selvityksiä erityisesti ensiharvennusmänniköitten kuitupuun puuaineen kuiva-tuoretiheydestä ja kuoren kuivamassaprosentista. Mikäli laskelman lähtökohtana on hakekuorman tilavuus käyttöpaikalla, on otettava huomioon myös painuminen kuljetuksen aikana.

Hakkeen kuivamassaan perustuvan mittauksen muuntoluvut riippuvat käytetystä konekalustosta lähinnä vain runkopuun hävikin ja selluhakkeen kuoripitoisuuden osalta. Hakkeen irtotilavuuteen perustuvan mittauksen muuntoluvut sen sijaan ovat enemmän tilanne- ja konekohtaisia, koska niihin vaikuttavat lisäksi esimerkiksi hakkeen kuormaustapa, haketorven puhallusvoima ja kuorman painuma.

7 Tuottavuus ja kustannukset

7.1 Karsinta-kuorinta-haketustyön tuottavuus

Karsinta-kuorinta-haketusprosessin tuottavuus määräytyy toisaalta varsinaisen tehotyön tuottavuuden ja toisaalta työn keskeytysten tuloksena. Tuottavuuteen vaikuttavat ennen kaikkea konekaluston kapasiteetti ja toimivuus, koneen asemapaikka, työmaajärjestelyt, autokuljetuksen toimivuus, vuodenaika, kuljettajien ammattitaito ja

motivaatio sekä raaka-aineen ominaisuudet.

Karsinta-kuorinta-haketusprosessin tuottavuutta *tutkittiin pelkästään Vuoksenlaakson puutavara-aterminalissa*, missä osapuoli oli työskentelyn kannalta edullisissa korkeissa pinoissa. Hake puhallettiin suoraan kuorma-autoon, joka siirsi sen 3 km:n päässä sijainneelle tehdasvarastolle. Autot joutuivat odottelemaan mittaus- ja purkuvuorojaan tehtaalle saapuvien puutavara-autojen lomassa pitkissä jonoissa, mikä jarrutti koko työ-

Taulukko 7. Kolmen kuljettajan (A, B, ja C) tehotyöajan rakenne karsinta-kuorinta-haketuskäsittelyssä terminaalisissa.

Table 7. Structure of the productive time of three machine operators (A, B and C) in delimiting-debarking-chipping work at the timber terminal, interruptions excluded (*cmin/grapple load, **cmin/tonne of dry mass).

Toiminto – Activity	Kuljettaja – Operator		Ajan käyttö – Time consumption		%	
	A+B cmin/taakka*	C Ajan käyttö – cmin/t**	A+B	C	A+B	C
Kuormaimen siirto tyhjänä <i>Moving unloaded crane</i>	7	9	65	125	20	21
Taakan otto pinosta <i>Grappling trees from pile</i>	8	9	68	120	19	21
Kuormaimen siirto kuormattuna <i>Moving loaded crane</i>	11	12	98	165	29	27
Odotus syötössä <i>Waiting for jammed flail</i>	2	2	20	34	6	6
Taakan syöttö <i>Infeeding the grapple load</i>	8	8	71	119	20	20
Apu aika – By-time	2	2	19	29	6	5
Yhteensä – Total	38	42	341	592	100	100

ketjun toimintaa.

Varastojärjestelyistä johtuen tuottavuuden tutkiminen rajoitettiin lähinnä tehoajan käyttöön ja rakenteeseen karsinta-kuorinta-haketusprosessissa. Tuottavuus mitattiin *selluhakkeen kuivamassana tehoutuntia kohti*. Työajassa eivät niinmuodoin ole mukana auton odotuksesta, konerikoista, koneen huollosta ja muista syistä aiheutuneet keskeytykset. Sen sijaan *tehotyössä ovat mukana apuajat*: aloitusvaiheen valmistelut, haketerven kääntäminen, koneen siirrot työn edistyessä sekä aika, joka käytettiin koneen ympäristön puhdistamiseen prosessitähteistä. Terminaalioloissa apuaikojen merkitys on kuitenkin vähäinen, eivätkä ne kasvattaneet kuljettajan ajankäyttöä enempää kuin 6 %:lla.

Tutkimuksessa oli mukana 3 kuljettajaa, kaikki tehtävään motivoituneita ja puutavarakuormaimen käsittelyyn hyvin harjaantuneita. Kahdella heistä (A ja B) työn rakenne ja tahti samoin kuin kouraisutaakan koko erosivat perin vähän, joten heitä koskevat aikatutkimustulokset on yhdistetty. Kolmas kuljettaja (C) sen sijaan käytti taakkakohtaiseen työsykliin 10 % enemmän aikaa, ja taakan koko oli hänellä kolmanneksen pienempi.

Tyhjänäpyörimisaika antaa osviittaa siitä, miten paljon tehotyöajan tuottavuutta ehkä vielä voitaisiin kasvattaa kuormaimen toimintoja nopeuttamalla. Torvesta purkautuvan hakkeen pe-

rusteella määritetty *hakkurin tyhjänäkäyntiaika* oli helmi-maaliskuussa 1992 kuljettajilla A ja B keskimäärin 11,6 % mutta kuljettajalla C jopa 28,9 % tehotyöajasta. Metsätehon tutkimusten mukaan *syöttöpöydän tyhjänäkäyntiaika* on hakkuriin verrattuna suunnilleen kaksinkertainen (Kuitto & Rieppo 1992). Karsinta-kuorintalaitteen piiskaavat ketjut ilmeisesti sysäivät syöttöruillien kuljettamille puille lisävauhtia ja nopeuttavat siten pöydän tyhjentymistä. Viisimetriset puut törmäävät hakkurin laikkaan puoleksi jo ketjurummut ohitettuaan, jolloin vasta niitten etenemisnopeus hidastuu syöttölaitteen ja hakkurin nopeuden mukaiseksi. On huomattava, että karsinta-kuorintalaitteen toiminta edellyttää tiettyä tyhjänäkäyntiaikaa, jottei laite tukehtuisi tähteeseen.

Kuljettajan tehotyöaika kuluu lähes kokonaisuudessaan kuormaimen käsittelyyn. Siksi tehotyön tuottavuus riippuu toisaalta hänen taidostaan käsitellä karsimatonta osapuuta kuormaimella sekä toisaalta kuormaimen nopeudesta ja liikeradoista, osapuupinojen sijainnista koneen syöttöpöytänsä nähden sekä puutavaran ominaisuuksista taakan muodostamisen ja syötön kannalta. Kouran siirto tyhjänä syöttöpöydältä pinolle ja taakan kanssa takaisin syöttöpöydälle vie puolet kuljettajan työajasta, kun taakkaa on samalla käännettävä 90° (taulukko 7). Jos syöttö voisi tapahtua taakkaa kääntämättä, siis ikään-

kuin vain pinosta vetämällä, tai jos kuormaimen liikkeitä voitaisiin muuten nopeuttaa, ajan säästö olisi merkittävä. Tutkimuksen valmistumisen jälkeen prosessoriin onkin asennettu kotimainen, toimintoiltaan nopeampi kuormain, jonka etuna on myös 3 m pidempi ulottuvuus.

Kunkin kuljettajan tehoajan tuottavuus nähdään seuraavista luvuista. Ne vastaavat hyvin Metsätehon mittaamia tuloksia, joitten mukaan tehoajan menekki oli terminaalitöskentelyssä talvella 0,6–0,9 min/i-m³ ja kesällä 0,5–0,6 min/i-m³ (Kuitto & Rieppo 1992). Kuljettajan C muita alhaisempi tuottavuus johtui pääosaltaan taakan pienestä koosta:

Kuljettaja	Taakan koko, m ³	Tehoajan tuottavuus		
		i-m ³ /h	m ³ /h	Kuiva-massa, t/h
A	0,295	121,4	49,9	18,5
B	0,304	109,5	45,0	16,7
C	0,192	66,3	27,3	10,1

Tehotyön osuus apuaikoinen oli vain 56,1 % kaikesta työmaa-ajasta. Täysinäisten hakeautojen pitkien jonotusaikojen vuoksi tässä yhteydessä ei ole tarkoituksenmukaista laskea järjestelmän todellista tuottavuutta työvuoroa tai -päivää kohti. Terminaalilla toimittaessa tehotyön osuus apuaikoinen lienee kuitenkin kohtuudella nostettavissa 75–80 %:iin. Tutkimusajankohtana keskeytykset aiheutuivat ensisijaisesti tehdasalueen yleisistä järjestelyistä, erityisesti autojen ruuhkaantumisen, eivätkä suinkaan tutkimuksen kohteena olevan korjuujärjestelmän ongelmista tai koneen teknisistä häiriöistä. Ellei autojen ruuhkaantumisen voida varastojärjestelyjä tehostamallaan välttää, eräs mahdollisuus odotusaikojen vähentämiseksi olisi käyttää hakkeen siirtämiseen terminaalilta läheiselle tehdasvarastolle kahta autoa, joilla on yhteinen kuljettaja.

Pohjois-amerikkalaisissa tutkimusjulkaisuissa on runsaasti tietoja ketjukarsinta-kuorinta-haketusprosessin tuottavuudesta. Niitä on kuitenkin vaikea vertailla tämän tutkimuksen tuloksiin, sillä raaka-aine, työmaajärjestelyt, konekalusto, kuljettajien ammattitaito ja mittayksiköiden vaihtelevat suuresti. Myös toiminnalliset keskeytykset on huomioitu eri tutkimuksissa eri tavoin. Useimmissa tapauksissa selluhakkeen kuivamassana mitattu tehotyön tuottavuus asettuu välille 10–20 t/h (Watson & Twaddle 1990a). Peterson Pacific DDC 5000 yksikön tuotostutkimuksista lienee käsillä olevan kanssa vertailukelpoinen lähinnä Nova Scotiassa Kanadassa tehty, jossa kokonaisista 0,10 m³:n havupuista valmistui metsävarastolla selluhaketta kuivamassana 18,6 t tehotunissa (Raymond & Franklin 1990a ja c).

7.2 Ketjujen kestävyys ja kustannukset

Karsintaan ja kuorintaan käytettävät ketjut on tarkoitettu alunperin metsätraktorin pyörien luistoa estämään. Piiskauskäsittelyssä ne kuluvat nopeasti. Niistä koostuu jopa 20 % ketjukarsinnan ja -kuorinnan kokonaiskustannuksista (Stokes & Watson 1989). Esimerkiksi Yhdysvaltain etelävaltioissa yleisimmin käytetyt ketjutyyppit, Campbell Beacon 7 ja Peerless Chain, kestävät keskimäärin vain 200–300 kuivatonnin tuotannon (Alt 1991).

Suomessa ketjuja valmistaa OFA Oy. Tuotanto on kaikkiaan 2000 t vuodessa, josta 60 % viedään ulkomaille lähinnä Yhdysvaltoihin, Kanadaan ja Ruotsiin. Noin 10 % tuotannosta ohjautuu ketjukarsintaan.

Ketjut tehdään kelalle kierretystä teräslangasta. Ensin siitä katkaistaan lenkin pituutta vastaava pätkä, joka pujotetaan valmiiseen lenkkiin, taivutetaan lenkin muotoon ja hitsataan yhteen. Kestävyyden parantamiseksi ketjut lämpökäsitellään tavoitteesta riippuen joko nuoruttamalla tai hiilletyskarkaisulla. Liiallinen karkaisukuumaus johtaa kovaan, kulutusta kestävään mutta haurauden vuoksi helposti murtuvaan teräkseen, kun taas liian alhainen lämpötila johtaa pehmeään ja nopeasti kuluvaan teräkseen. Karkaisu voidaan vielä viimeistellä uudella lämpökäsittelyllä eli päästämisellä. Koko tuotantoprosessiin liittyy keskeisesti tiukka laaduntarkkailu.

Käytännössä ketjujen laatu ja kestävyys vaihtelevat suuresti. Niihin vaikuttavat metalliseoksen koostumus, karkaisu- ja päästökäsittelyt, hitsaussauman pitävyys ja laaduntarkkailun tehokkuus. Tässä tutkimuksessa vertailtiin viittä eri ketjutyyppiä, jotka kaikki olivat Imatra Steel Oy:n (nykyinen OFA Oy) valmistamia. Yksi niistä oli Pertti Szepaniak Oy:n käytössä oleva vakiovalmisteinen ketju IB 20 NB ja muut neljä tätä tutkimusta varten valmistettuja koeketjuja. Kaikki ketjut olivat kahdeksanlenkkisiä. Teräslangan alkuperäinen paksuus oli 16 mm. Koko ketjun pituus oli 390 mm ja massa noin 2 kg.

- 1 IB 20 NB, pintakarkaistu ja päästetty (vakioketju)
- 2 IB 20 NB, karkaistu mutta ei päästetty
- 3 IB 5, pintakarkaistu ja päästetty
- 4 IB 5, pintakarkaistu mutta ei päästetty
- 5 IMACRO EL 700, karkaistu mutta ei päästetty

Ketjut jakaantuivat testissä kahteen verraten tasalaatuiseen ryhmään. *Kahden ensimmäisen kestävyys oli huomattavasti parempi* kuin kolmen viimeisen. Siksi tarkastelu rajoitetaan seuraavassa vain IB 20 NB -sarjan ketjuihin, jotka menes-

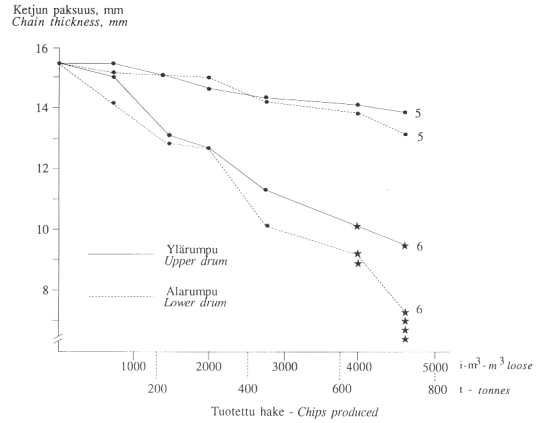
tyivät kokeissa parhaiten. Koska koe oli liian suppea osoittaakseen niitten keskinäisen paremmuuden, tulokset esitetään keskiarvoina.

Pyörimisliike, puun piiskaus ja ketjujen iskut toisiaan ja laitoja vastaan aiheuttavat nopeaa kulumista. Soikeat lenkit ohenevat päistään. Kulutus on voimakkainta lenkin ulommassa päässä, mutta ohentunut lenkki voi pyörähtää ympäri, jolloin kulumisrasitus tasoittuu.

Useissa tutkimuksissa on todettu, että *kuluminen* on voimakkainta kolmannessa lenkissä ketjun avoimesta päästä lukien (Raymond & Franklin 1990a ja b, Watson & Twaddle 1990a, Carte 1991). Ilmiö oli selvä myös tässä tutkimuksessa. Kahdeksanlenkkisen ketjun kuudes ja seitsemäs lenkki alarummulla sekä kuudes lenkki ylärummulla kuluivat muita nopeammin. Tämä nähdään seuraavasta asetelmasta, joka osoittaa kunkin lenkin ohuimman kohdan paksuuden 2723 i-m³:n eli 430 kuivatonnin tuotannon jälkeen kolmen parhaan eli IB 20 NB ketjujen keskiarvona:

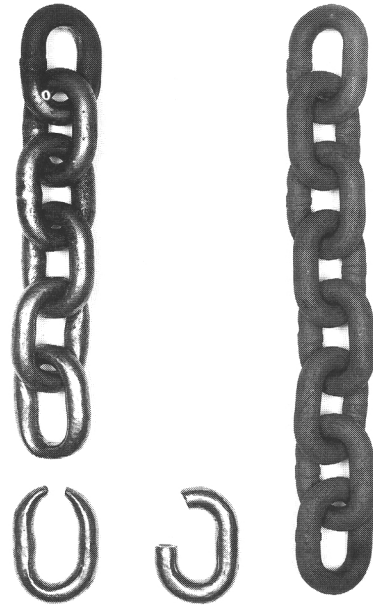
Lenkin järjestys kiinnityspisteestä lukien	Ylärumpu Lenkin ohuin kohta 430 tonnin jälkeen, mm	Alarumpu
1	15,11	15,10
2	15,15	14,98
3	14,99	14,48
4	14,59	14,13
5	14,29	13,92
6	11,52	10,89
7	13,51	10,13
8	14,47	13,46

Kuvassa 13 on esimerkki kulumisen edistymisestä vakiotyyppisen ketjun viidennessä ja kuudennessa lenkissä. Viidennessä samoin kuin sitä edeltävissä lenkeissä kuluminen oli kokeen pitkään keston nähden melko vähäistä, mutta kuudennessa lenkissä se moninkertaistui. Alarummulla, jossa ketjuihin kohdistui suurempi rasitus kuin ylärummulla, seitsemäs lenkki kului vieläkin nopeammin. Lee Jackson on osoittanut videokuvauksen avulla, että kahdeksan- ja yhdeksänlenkkisen ketjun kuusi ensimmäistä lenkkiä säilyvät piiskauksessa suorassa asennossa, kun sen sijaan uloimmat lenkit taittuvat. Ketju iskee puuhun terävimmän siis kuudennessa lenkillään. Kimpoavien ketjujen iskut toisiaan vasten lisäävät rasitusta. Muodoltaan lyhyet lenkit palautuvat alkuperäiseen asentoonsa nopeammin kuin pitkät. Videokuvasta nähdään myös, että kun puut syötetään piiskaukseen loivasti viistosuuntaisina, ketjujen iskut toisiaan vastaan vähenevät ja kuorintatulos näyttää paranevan (Watson 1992).



Kuva 13. IB 20 NB-ketjun 5. ja 6. lenkin kulumisen ylä- ja alarummulla tuotetun hakkeen irtotilavuuden ja kuivamassan funktiona. Tähdet osoittavat puuttuvien lenkkien lukumäärän alkuperäisestä yhdeksästä ketjusta. Vakiotyyppinen ketju.

Figure 13. Wear on the fifth and sixth links of the IB 20 NB chain in the upper and lower drum as a function of the loose volume and dry mass of chips produced. Number of missing links from the initial nine chains indicated by asterisks. Standard chain.



Kuva 14. Ketjun kuluminen. Oikealla uusi kahdeksanlenkkinen ketju ja vasemmalla pettänyt ketju. Alhaalla kaksi irrallista lenkkiä, joista toinen on irronnut kulumisen ja toinen hitsausauman pettämisen seurauksena (kuva Erkki Oksanen).

Figure 14. Chain wear. A new eight-link chain on the right and a failed chain on the left. Two broken links below; one failed at the link weld and the other as a result of excessive wear (photo Erkki Oksanen).

Taulukko 8. Lenkkien häviäminen IB 20 NB -ketjuista haketuotannon edistyessä.
Table 8. Loss of links from the IB 20 NB chains as a function of chip production.

Lenkin nro N:o of link	Tuotettu hake, kuivatonna – Chips produced, dry tonnes					
	142	229	313	430	625	715
Puuttuvia lenkkejä, % – Missing links, %						
Ylärumpu – Upper drum						
5	–	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	7	7
7	–	7	7	19	37	52
8	4	15	22	26	48	63
Alarumpu – Lower drum						
5	–	–	–	4	7	7
6	–	–	–	11	29	39
7	11	14	21	36	79	86
8	21	32	39	54	89	92

Lenkin ohentuminen ei sinänsä vaikuta piiskausteeseen. Kuorintatulos alkaa kärsiä vasta siten, kun ketjuista häviää kokonaisia lenkkejä. Carten (1991) tutkimuksessa erityyppiset ketjut murtuivat yleensä 8,9–11,4 mm:n paksuudessa. *Lenkin murtuminen* on seuraus joko kulumisesta, teräksen hauraudesta tai epäonnistuneesta hitssaumasta (kuva 14). Sen sijaan venyminen tai muu muodonmuutos ei näytä olevan murtumien syynä. Tässä tutkimuksessa ketjun pituus venyi kokeen kestoajana vain 0,5 %, mikä kokonaisuudessaan aiheutui lenkkien kulumisesta.

Ketju petti yleisimmin ensimmäiseksi seitsemännestä lenkistä, jolloin siis samantien hävisi kaksi lenkkiä. Monasti petti ensimmäisessä vaiheessa kuitenkin yksinomaan kahdeksas lenkki, vaikka kulumisen sitä suinkaan näyttäneet edellyttävän. Kun ketjut takovat toisiaan, rasitus kohdistuu rajuimpana ulompiin lenkkeihin ennenaikaisia murtumia aiheuttaen. Seuraavat luvut osoittavat, minkä lenkin kohdalla IB 20 NB -ketju ensimmäiseksi eri tapauksissa petti. Huomattakoon, että ensimmäisen murtumisen jälkeen ketjusta häviää ennen pitkää vielä uusia lenkkejä, mutta näitä myöhempiä murtumia ei ole kirjattu tähän asetelmaan:

Lenkin järjestys kiinnityspisteestä lukien	Ylärumpu Ensimmäisenä pettäneiden lenkkien osuus, %	Alarumpu
5	–	–
6	11,8	7,7
7	52,9	61,5
8	35,3	30,8
Yhteensä	100,0	100,0

Vaakarumpuisessa järjestelmässä ketjut kuluvat ja katkeilevat nopeimmin alarummulla. Tässä tutkimuksessa parhaitenkin ketjutyyppien uloimmista lenkeistä oli alarummulla hävinnyt 230 kuivatonnin tuotannon jälkeen kolmannes ja 430 tonnin jälkeen jo puolet. Ylärummulla hävikki eteni hitaammin.

Piiskausteho heikkenee viimeistään silloin, kun ketjusta häviää kaksi tai useampia lenkkejä. Tämän tutkimuksen IB 20 NB -ketjut näyttivät kestävän kohtuullisesti noin 250–300 kuivatonnin eli 1500–1900 i-m³:n haketuotannon, mihin mennessä kolmannes ketjuista oli pettänyt (taulukko 8). Kuorintatulos kärsii jo tässä vaiheessa nimenomaan siksi, että lenkkejä häviää erityisesti alarummulta ja rumpujen keskiosan ketjuista eli siis laitteen niistä osista, jotka aggressiivisimmin osallistuvat karsintaan ja kuorintaan. Yhdeksästä rinnakkaisesta ketjusta lenkkien hävikki oli suurin viidessä keskiketjussa. Reunaketjut kummallakin puolella säilyivät pisimpään ehjinä.

Yhden ketjun hinta on 19 mk. Tässä tutkimuksessa käytetty rumpupari vaati yhteensä 111 ketjua, jolloin koko ketjusarjan hinta oli 2110 mk. Kun siihen lisätään kahden miehen kahden tunnin vaihtotyöstä 400 mk, on ketjusarjasta koitua kokonaiskustannus yhteensä 2510 mk. Jos ketjusarjan kestoikä vastaa keskimäärin 275 kuivatonnin tuotantoa ja koko sarja uusitaan kerralla, ketjukustannus on 9,12 mk/kuivatonna eli 1,48 mk/i-m³. Tulos vastaa kanadalaisia kokemuksia (Raymond & Franklin 1990a ja b).

Korkea ketjukustannus rasittaa menetelmän kilpailukykyä. On tärkeätä pidentää käyttöikää kehittämällä ketjuja edelleen nimenomaan piiskaus-

käsittelyn rasituksia kestävämpään. Sen jälkeen kun käsillä oleva tutkimus päättyi, OFA Oy on jo toteuttanut hitsausaamojen pitävyyttä ja pintakarkaisun tasaisuutta edistäviä toimenpiteitä.

Kustannuksia voidaan alentaa myös työn ja toiminnan suunnittelulla. Niihin on tarjolla ainakin seuraavia keinoja (Sauder & Sinclair 1989, Carte 1991):

- Koska kuluminen etenee nopeimmin ketjun uloimmissa lenkeissä ja hitaimmin ripustus päässä, kestoikää voidaan pidentää *kääntämällä ripustussuunta* hyvissä ajoin päinvastaiseksi.
- Koska kuluminen edistyy rummun eri osissa erilailla, kestoikää voidaan pidentää *asemoimalla ketjut* hyvissä ajoin uudelleen.
- Jos kiinnitetään *samaan ripustukseen kaksi ketjua*, kuorintateho paranee ja ketjujen kestoikä pidentyy niin paljon, että ketjukustannus saattaa jopa alentua.
- Koska ketjun kulutus kasvaa rummun pyörimisnopeuden kiihtyessä, piiskauksessa tulisi välttää kovin suuria nopeuksia. *Kierrosnopeuden alenemisesta* seu-

raava kuorintatehon lasku voidaan kompensoida syötön nopeutta vastaavasti hidastamalla.

- Koska lenkit kuluvat lähinnä vain päistään, kulutusrasitus tasoittuisi, jos soikeitten sijasta käytettäisiin *pyöreitä lenkkejä*. Sellaisten valmistaminen on kuitenkin vaikeampaa, eikä myöskään ole varmaa näyttöä siitä, että pyöreälennkinen ketju piiskaa yhtä aggressiivisesti kuin soikeälennkinen.

Ketjuihin rinnastettava kustannus syntyy myös hakkurin teristä. Koska raaka-aine puhdistuu piiskauksikäsitellyssä, terien kulutus on pienempi kuin samalla raaka-aineella kokopuuahaketuksessa. Terät joudutaan vaihtamaan noin 1500 i-m³:n eli 240 kuivatonnin haketuotannon välein. Kolmiteräisen sarjan hankintahinta on 1200 mk, ja se voidaan kunnostaa 25–30 kertaa. Sarjan vaihtoon kuluu yhdeltä mieheltä 25–35 min, jolloin vaihtotyön kustannus on 50 mk ja sarjan teroituksen 100 mk kerralta. Näin hakkurin teristä koitua kustannus on 0,74 mk kuivatonnilta eli 0,11 mk/i-m³.

8 Menetelmän soveltuvuus Suomen oloihin

Ensiharvennukset ovat välttämätön osa suomalaista puuntuotantjärjestelmää. Ellei kaupallisia ensiharvennuksia voida tulevaisuudessa toteuttaa, pohja kestävä metsänhoidon harjoittamiselta romahtaa. Kysymys ei siis voi olla siitä, toteutetaanko ensiharvennukset vai jätetäänkö ne tykkäänään tekemättä. Ensiharvennuksista on kertakaikkiaan huolehdittava, ja tutkimuksin on löydettävä ratkaisut, joilla tehtävästä suoriudutaan tehokkaimmalla tavalla. Tehokkuus ei tuolloin merkitse yksinomaan korkeata työn tuottavuutta ja kohtuullista kustannustasoa, vaan yhtälailla myös biomassan tehokasta talteenottoa, laadukasta raaka-ainetta, työn toteuttamista oikea-aikaisesti sekä ekologisesti ja puuntuotannon jatkuvuuden kannalta kelvollista korjuutulosta.

Ketjukarsinta ja -kuorinta on uusi kokopuuna-korjuun periaatteelle rakentuva vaihtoehto, joka Yhdysvalloissa ja Kanadassa on viime vuosina saavuttanut nopeasti jalansijaa erityisesti pienikokoista kuitupuuta tuottavissa leimikoissa. Suomessa kehitetty korjuujärjestelmä eroaa aikaisemmista ratkaisuista siten, että kun Pohjois-Amerikassa karsimattomat puut tuodaan metsästä tienvarteen kokonaisina laahustraktorilla, niin meillä kuljetus tapahtuu viisimetrisiksi katkaisu-osapuuna kantavalla kuormatraktorilla. Suo-

malainen ratkaisu on onnistuttu mukauttamaan vakiotyypin traktorikaluston käyttöön ja ensiharvennusleimikoihin, joissa jäljelle jäävän metsikön kunnolle asetetaan melkoisen ankarat vaatimukset. Yhdysvalloista hankittuun ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikköön, jonka ympärille koko korjuujärjestelmä keskeisesti rakentuu, on luonnollisesti jouduttu tekemään olosuhteitten edellyttämiä muutoksia.

On huomattava, että menetelmän käyttö rajoittuu toistaiseksi ensiharvennusmänniköihin, joista korjattava kuitupuu ohjautuu sulfaattimassan raaka-aineeksi. Kuusen ensiharvennusleimikoihin menetelmän käyttöaluetta ei ole ainakaan vielä pyritty laajentamaan, sillä mekaanisen massan raaka-aineena kuusikuitupuun kuorintavaatimukset ovat ankarammat kuin männyn. Vuosien 1991 ja 1992 aikana toteutetun tutkimus- ja kehitysohjelman tuloksena voidaan ketjukarsinta-kuorinta-haketusmenetelmän soveltuvuudesta ensiharvennusmänniköitten puunkorjuuseen Suomessa tehdä seuraavat johtopäätökset:

1. Ketjukarsinta-kuorinta-haketusmekaniikka tarjoaa mahdollisuuden pienikokoisen kuitu- ja energiapuun integroituaan korjuuseen. Rungon kuoresta, latvusmassasta ja hukkarunko-

puusta koostuvan energijakeen talteenotto-tavoite on tasapainotettava energiapuun hin- nan ja metsämaan ravinnevaatimusten poh- jalta. Jos on syytä pelätä ravinnetasapainon vaarantuvan, kasvupaikalle tulee jättää lat- vusmassaa. Jos taas ensisijaisena pyrkimyksenä on hyödyntää tarkoin myös hakkuupois- tumen energiaosuus, on teknisesti mahdollis- ta ottaa sekä rungon että latvuksen massa talteen lähes kokonaisuudessaan. Koska ener- gijakeelle ei taloudellisen kilpailukyvyyn puutteen vuoksi ollut kysyntää, alle 7 cm:n latvaosa jätettiin tässä tutkimuksessa metsään. Rinnankorkeuslöpimitaltaan 10–12 cm:n mäntyjen biomassasta joutui silloin 19 % metsätähteeksi ja 18 % prosessitähteeksi, jo- ten seulomattoman selluhakkeen kertymä oli 63 % hakkuupoistuman biomassasta.

2. *Runkopuun kertymä* on selvästi korkeampi kuin perinteisellä tavaralajimenetelmällä vas- taavissa oloissa, sillä viimeksi mainittuun kuu- luvassa rumpukuorinnassa ohuen ensiharven- nuspuun hävikki nousee pölkkyjen pirstoutu- misen ja pensselöitymisen seurauksena usein suureksi, puhtausvaatimuksesta ja laitteistos- ta riippuen (Niemeläinen 1992). Tässä tutki- muksessa hakkuupoistuman kuorettoman run- kopuun kuivamassasta saatiin kuorettomana selluhakkeena talteen 87 %. Hävikki koostui alle 7 cm:n latvapuun muodostamasta metsä- tähteestä (10 %) ja ketjukarsinta-kuorinta- haketuskoneen prosessitähteestä (4 %).
3. Kuorinta- ja haketustekniikka ratkaisevat hak- keen palakokojakauman ja kuoripitoisuuden, jotka ovat tärkeitä selluhakkeen ominaisuuksia. *Palakoon* osalta saavutettiin asetettu vaa- timus niukasti, kun purun ja neulahakkeen osuudet pyrkivät hakkurin terien riittämättö- mästä säätövarasta johtuen nousemaan suu- riksi. *Kuoripitoisuuden* osalta ei saavutettu asetettua 1 %:n rajaa. Erityisesti talvella oli vaikeuksia, mutta kuorintatuloksen paranta- minen lienee mahdollista koneen syöttöön ja säätöihin liittyvin keinoin.
4. Korjuujärjestelmän kokonaisuus määräytyy ketjukarsinta-kuorinta-haketuskoneen asema- paikasta riippuen. *Välivarastolla toimittaes- sa* kuljetus tehtaalle tapahtuu hakkeena, jol- loin auton kuormakapasiteetti voidaan hyö- dyntää tehokkaasti. Ongelmana kuitenkin on, että välivarastohaketus asettaa tiukat vaati- mukset leimikon vähimmäiskoolle, varaston tilajärjestelyille, metsätiestön kantavuudelle sekä hakkeen tuotannon ja autokuljetuksen saumattomalle yhteensovittamiselle kuumen korjuuketjun puitteissa. Jos työskentely sen sijaan keskitetään puu- tavaraterminalille, menetelmän sovellusalue laajenee pienempiinkin leimikoihin, eivätkä varastopaikkojen ahtaus ja tieverkosto muo- dostu enää yhtä vakaviksi rajoitteiksi. Termi- naalivaihtoehto myös vaimentaa kuumen kul- jetusketjun organisatorisia ongelmia, kohentaa ketjukarsinta-kuorinta-haketuskoneen käyttöastetta, helpottaa huoltoa ja laaduntark- kailua sekä edistää lähinnä oksista ja kuores- ta koostuvan prosessitähteen energiakäyttöä. Häiriöttömän toiminnan takaamiseksi, kus- tannusten alentamiseksi sekä leimikkovali- koiman kartuttamiseksi huomattava osa raa- ka-aineesta kannattaneekin käsitellä terminaa- lilla. Haittapuolena on kuitenkin autojen kuor- makapasiteetin vajaakäyttö, kun hakkeen si- jasta kuljetetaan karsimatonta osapuuta.
5. Terminaalilla työskenneltäessä *ketjukarsin- ta-kuorinta-haketuskoneen tuotos* oli 64–117 i-m³ eli 10,1–18,5 t kuivamassaa tehotunnis- sa. Samalla syntyi 2,4–4,3 kuivatonna polt- toainekäyttöön kelvollista prosessitähdettä. Jos tehotyön ja siihen liittyvän aputyön osuus on 75 % työmaa-ajasta, koneen kuljettajan tuottavuus on 400–700 i-m³ eli 60–110 kui- vatonna haketta työvuoroa kohti.
6. Piiskauksessa käytettävien *teräsketjujen kus- tannus* on huomattavan korkea, tämän tutki- muksen mukaan 1,48 mk/i-m³ eli 9,12 mk/t kuivamassaa. Kustannusta tulee alentaa ket- juja kehittämällä ja niiden käytön suunnitte- lua tehostamalla.
7. Tähän julkaisuun ei liitetty varsinaisia *kus- tannuslaskelmia*, koska ne sisältyvät Metsä- tehon rinnakkaiseen tutkimukseen. Enso-Gut- zeit Oy:n kokemukset kuitenkin osoittavat, että ketjukarsintamenetelmä alentaa ensihar- venumännyn hankintakustannuksia tavarala- jimenetelmään verrattuna 15–20 mk/m³ eli 55–75 mk/t kuivamassaa.
8. Metsästä korjatun kuorellisen runkopuun ti- lavuus on johdettavissa luovutus- ja työmit- taa varten muuntoluvulla hakemitasta. Ennen autokuljetusta todettu kuorettoman hakkeen irtotilavuusmitta voidaan tämän tutkimuksen mukaan *muuntaa runkopuun kuorelliseksi*

kiintotilavuudeksi kertoimella 0,496 ja kuoretoman hakkeen kuivamassa tonneista kuorelliseksi kiintotilavuudeksi vastaavasti kertoimella 3,13. Aineiston riittämättömyyden vuoksi tarvitaan kuitenkin perusteellisempi selvitys, jos tällaiset muuntoluvut halutaan pysyvästi käyttöön puutavaran mittauksessa.

9. Toimintamalli, jossa otetaan talteen vain 7 cm:n läpimitan täyttävä runkopuu, jättää ainakin puolet hakkuupoistuman latvusmassasta tähteenkiin. Näin menetellen *metssämaan ravinnetappiot* eivät voi olla käytännössä läheskään yhtä vakavia kuin sellaisissa järjestetyissä tieteellisissä kenttäkokeissa, joissa harvennuskäytöstä on poistettu kaikki hakkuutähdet ja sen seurauksena aiheutettu eri tutkimuksissa 0–10 %:n tuotostappioita

jäljelle jääneen puuston kasvussa (Andersson 1984, Kukkola & Mälkönen 1985, 1992, Hakikila 1989).

10. Ketju-karsinta-haketustekniikka on Suomessa ja koko Euroopassa uutta, ja mahdollisuudet sen kehittämiseen ovat suuret. Kun *menetelmäkehittely jatkuu*, erityisesti seuraaviin seikkoihin tulee kiinnittää huomiota: karsinta-kuorinta-haketuskäsittelyssä syntyvän prosessitähteen hyödyntäminen energiäkäytössä, korjuujärjestelmän organisatorinen kehittäminen, menetelmän mukauttaminen yksityismetsien pieneen leimikoihin ja männyn lisäksi myös muille puulajeille, kuorintatulojen parantaminen, piiskausketjujen kustannusten alentaminen.

Kirjallisuus – References

- Alt, B. C. 1991. Maintaining chain flail delimeter-debarker chain. APA Technical Release 91-R-56. 2 s.
- Andersson, F. 1984. Logging residue is good for forest. Julkaisussa: Andersson, B. & Falk, S. (toim.). Forest energy in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences. s. 98–99.
- Baughman, R., Ringlee, D. & Schmidt, P. 1989. Flail development – one company's experience. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.). IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans. IEA report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 69–73.
- Berlyn, R. W. 1990. Trial of a double-drum flail delimeter/debarker processing small-diameter frozen timber: phase II. Feric Special Report SR 68. 26 s.
- Carte, I. C. 1991. In-woods chain flail delimiting/debarking and its effect on debarking chain wear. A thesis submitted to the Faculty of Mississippi State University. 49 s.
- Cossens, P. 1989. Chain flail delimiting experiences in New Zealand. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.). IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans, IEA report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 74–87.
- Edman, T. 1989. Small stem thinning in the Pacific northwest with barking and chipping in the woods. Kirjassa: Stokes, B. J. (toim.). International Energy Agency Bioenergy Agreement, Activity 3 – Harvesting small trees and forest residues. Proceedings from an international symposium: 126–130.
- Evaluation of a Peterson Pacific delimeter/debarker/chipper (DDC 5000) processing small diameter timber in Central Newfoundland. 1990. Department of Forestry and Agriculture. Forest Products and Development Division, Newfoundland, Canada. Report 56. 13 s.
- Favreau, J. 1992. Peterson-Pacific DDC 5000 delimeter-debarker-chipper: New observations. Feric Field Note: Processing-29. 3 s.
- Gingras, J. F. 1989a. A review of chain flail applications in eastern Canada. ASAE International Winter Meeting, New Orleans, Louisiana. 5 s.
- 1989b. Flail delimeter-debarkers: an interesting alternative to conventional systems. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.). IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans. IEA Report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 62–68.
- Grace, L. A., Yu, J. G. & Stuart, W. B. 1989. An evaluation of a Peterson chain flail delimeter/debarker at a remote chip yard. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.): IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans, IEA report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 112–151.
- Hakkila, P. 1979. Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland. Communications Instituti Forestalis Fenniae 96(3). 56 s.
- 1984. Forest chips as fuel for heating plants in Finland. Folia Forestalia 586. 62 s.
- 1989. Utilization of residual forest biomass. Springer-Verlag, Heidelberg. 568 s.
- 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. 24 s.
- 1992 (toim.). Metsäenergia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 422. 51 s.
- Hartler, N. & Stade, Y. 1979. Chip specifications for various pulping processes. Teoksessa: Hatton, J.V. (toim.). Pulp and paper technology series. Joint Textbook Committee of Paper Industry. s. 273–301.
- Harvennushakkuiden taloudellinen merkitys ja toteutta-

- misvaihtoehdot. 1992. Maa- ja metsätalousministeriö. 121 s.
- Imponen, V., Hämäläinen, J. & Örn, J. 1992. Hakkuun koneellistamisen taloudelliset ja organisatoriset vaikutukset. Summary: The economic and organizational effects of mechanization of cutting. Metsätehon Tiedotus 407. 21 s.
- Jonsson, T. 1989. Flail delimiting and chip upgrading. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.): IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans, IEA report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 88–98.
- Kanninen, K., Uusvaara, O. & Valonen, P. 1979. Kokopuuraaka-aineen mittaus ja ominaisuudet. Summary: Measuring and properties of whole-tree raw material. Folia Forestalia 403. 48 s.
- Kuitto, P.-J. & Rieppo, K. 1992. Kuoreton metsähakemennetelmä ensiharvennuspuun hankinnassa. Metsäteho, projekti A 2: 1027/1992. Tiivistelmä perusselvityksen tuloksista. 19 s.
- Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1985. Consequences of whole-tree harvesting in young coniferous stands. IUFRO Conference on Thinning, Moscow-Riga. 8 s.
- & Mälkönen, E. 1992. Hakkuutähteiden merkitys harvennusmetsikön kasvulle. Moniste. 11 s.
- Niemeläinen, P. 1992. Mäntyrunkopuun raaka-ainetase ketjukarsintamenetelmässä. Joesuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 40 s.
- Perrier, J. C. 1990. A study of chip quality from the Peterson Pacific DDC 5000. School of Forestry, Lakehead University. 71 s.
- Raymond, K. A. & Franklin, G. S. 1990a. Chain flail delimeter-debarkers: is your bark worse than their bite? Canadian Pulp and Paper Association, Woodlands Section, 71st Annual Meeting: E 101-E 105.
- & Franklin, G. S. 1990b. Malenfont prototype chain flail delimeter-debarker: productivity and chain wear. Feric Field Note: Processing 22. 2 s.
- & Franklin, G. S. 1990c. Chain flail delimeter-debarkers in eastern Canada: a preliminary assessment. Feric Technical Note TN-153. 8 s.
- Sauder, E. A. & Sinclair, A. W. J. 1989. Trial of a double-drum flail delimeter/debarker processing small-diameter frozen timber: phase I. Feric Special Report SR-59. 34 s.
- Seppänen, V., Ahonen, M. & Nikala, L. 1992. Kokopuu-hakkeen puhdistus Massahake-menetelmällä. Kokeet jatkuvatoimisella koelaitteistolla. VTT Tiedotteita 1408. 38 s.
- Sirén, M. (toim.) 1991. Flerträdsteknik och skonsamma maskiner i förstagallring. Folia Forestalia 772. 104 s.
- Stephenson, E. H. 1989. A historical perspective and review of current technology. Kirjassa: Stokes, B. J. (toim.). International Energy Agency Bioenergy Agreement, Activity 3 – Harvesting small trees and forest residues. Proceedings from an international symposium: 162–169.
- Stokes, B. J. & Watson, W. F. 1989. Field evaluation of in-woods flails in the southern United States. Kirjassa: Hudson, J. B. & Twaddle, A. (toim.). IEA/BA Task VI Activity 2: Integrated Harvesting Systems Workshop, New Orleans, IEA report. Aberdeen University Forestry Research Paper 3: 99–111.
- Twaddle, A. A., Stokes, B. J. & Watson, W. F. 1989. Chain flail processing: a new look at an old idea. LIRA. Technical Release 11:2. 8 s.
- Watson, W. F. 1992. Flail processing update. Teoksessa: Hudson, J.B. (toim.). IEA/BA Task IX/Activity 2. Integrated harvesting systems workshop, Eastern Finland. Aberdeen University, Forestry Research Paper 4: 5–11.
- & Twaddle, A. A. 1990a. An international review of chain flail delimiting-debarking. IEA report. Aberdeen University, Forestry Research Paper 3. 28 s.
- & Twaddle, A. A. 1990b. Quality of chips produced with chain flails and in-woods chippers. Kirjassa: Proceedings of the 1990 Tappi Pulping Conference: Toronto, Ontario: 855–860.
- , Twaddle, A. A. & Stokes, B. J. 1991a. Pulp chip quality from in-woods chippers coupled with chain flail delimeters-debarkers: does it match conventional woodyard quality? LIRA. Technical Release 13:2. 8 s.
- , Twaddle, A. A. & Stokes, B. J. 1991b. Quality of chips produced with chain flails and woodland chippers. Tappi Journal 74(2):141–145.
- Wood Supply Research Group. 1991. Harvesting trial IH1, May 29–30, 1991. Preliminary assessment of chain flail delimiting. University of Aberdeen. Mimeo-graph. 5 s.
- Ylä-Hemmilä, V. 1980. Szepaniakin esikarsintalaitteella varustettu hakkuri. Metsätehon katsaus 8/1980. 4 s.

Total of 43 references

Summary

Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine

The Finnish forest management system is based on repeated thinnings from below. Due to the low productivity of human labor and the high cost of harvesting, the first commercial thinning at the age of 25–35 years is becoming the critical link in this traditional practice. If the early thinning cuttings are neglected, the silvicultural basis of Finnish forestry breaks. Therefore, the question is not whether the early commercial thinnings should still be carried out in the future or not. The question is rather how to perform them in the most efficient way. Efficiency must then be understood in its broad sense. It does not refer only to high productivity and a reasonable cost level. In addition, it also means efficient recovery of biomass, good quality products, and ecologically sound and timely operations.

Flail delimiting-debarking offers a new harvesting alternative for the integrated recovery of clean chips for pulping and residual biomass for energy, based on the principle of whole-tree utilization. Over the past few years, this technique has been adapted widely in the USA and Canada for recovering small-sized timber for sulfate pulping, but in Europe its applicability has not yet been proven. Pertti Szepaniak Oy, a wood procurement enterprise specialized in the production and transport of chips, and Enso Gutzeit Oy, one of the largest forest industry enterprises in Europe, were the first to introduce flail delimiting-debarking-chipping technology in Finland (Fig. 1). During 1991 and 1992, the Finnish Forest Research Institute and Metsäteho participated in the development project and carried out a holistic evaluation of the suitability and prospects of the system in the operating environment under consideration. The present paper reports on the results of FFRI. The project benefited greatly from Activity 2 (Integrated Harvesting Systems) in Tasks VI and IX of the International Energy Agency (IEA) Agreement on Bioenergy Research and Development. The authors want to extend their special thanks to Professor W.F. Watson of the Mississippi State University, for his invaluable contribution to the project.

In the North American system, the hauling of whole trees to the landing site by skidder and processing by the flail delimiting-debarker-chipper are carried out simultaneously. In the Finnish system, on the other hand, off-road haulage and processing are separated from each other to alleviate the pressures of the hot harvesting schedule. Trees are felled by a chainsaw operator using the so-called felling-piling method. Haulage is carried out by a conventional forwarder equipped with a grapple

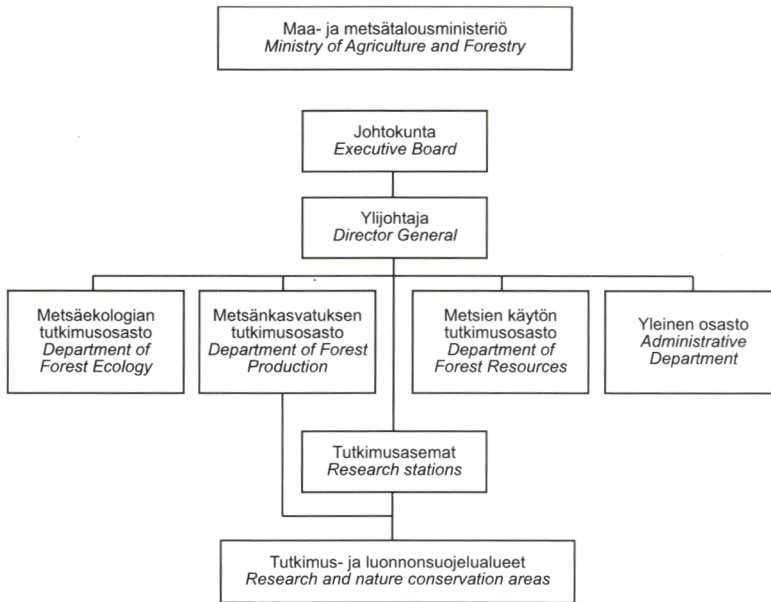
saw, which is used for bucking the undelimited trees into 5 m sections in conjunction with loading (Fig. 4). At the same time, the driver tops the trees at a diameter of 5–7 cm to reduce the loss of nutrients from the forest soil. To help the feeding of 5 m tree sections into the flail, the processor is equipped with a feeding table. The processing takes place at the forest landing or at a central terminal. If the terminal option is used, the on-road transport of raw material is carried out in the form of undelimited tree sections (Fig. 2).

At the present, the use of the system is limited to the first commercial thinning of Scots pine (*Pinus sylvestris*). The average stem volume of the trees removed is 0.05–0.07 m³ and the relative amount of live crown mass 20–30 % (Table 1) compared to the stem mass. The yield of stemwood is typically 40–45 m³/ha, including bark. The most important findings of the study are summarized below.

1. The system studied showed good possibilities for solving the problem of the early thinning of Scots pine stands. Since there was no demand for fuelwood, and to reduce the loss of nutrients from the site, the trees were topped on site at 5 or 7 cm (Fig. 3). Of the above-ground biomass of 10–12 cm thick pine trees, 19 % was then left in the forest as logging residue and 18 % as processing residue at the terminal (Figs. 5–7). The recovery of pulp chips was thus 63 % of the biomass of the logging removal (Fig. 11).
2. In the traditional harvesting system the breakage of thin bolts results in excessive wood loss in drum debarking. In the present study, stemwood recovery was unusually high as compared to the prevailing situation. Topping caused a loss of 10 % of the stemwood in the forest (Table 2), and processing at the terminal increased the loss by a further 3 or 4 % (Table 3). Consequently, 87 % of the stemwood of the logging removal was recovered in the form of clean chips (Fig. 12). The larger the trees, the lower was the loss of stemwood (Fig. 8).
3. Although the proportion of fines and pins tended to be high, the chips generally met the particle size requirement (minimum 80 % accepts) of the Finnish sulfate pulp mills. However, in the case of frozen wood and under-sized trees, the proportion of pins and fines (Tables 4 and 5, Fig. 9) and especially that of bark (Table 6, Fig. 10) was unacceptable. Therefore, the quality of the chips needs to be refined further.

4. The organization of the harvesting system is determined by the location of the delimiting-debarking-chipping processor. If processing takes place at a forest landing, rather strict requirements are set for the minimum size of a harvesting operation, the area of the landing site, the bearability of the forest roads, and the coordination and timing of the processor and trucks. These drawbacks constrain the application of the method in Finland, where the area of a private forest holding is typically only 40 ha. On the other hand, if the processor works at a central terminal, smaller logging sites can be accepted, the operation becomes less vulnerable to disturbances, the technical and operational availability of the processor increases, the quality control of chips improves, and the recovery of processing residue for energy becomes easier. Therefore, it seems to be more efficient to perform a considerable part of the processing at terminals. However, the transport of tree-sections from the forest landing to a terminal is more expensive per kilometer than transport of chips from the forest landing to a mill.
5. The productivity of the processor at a terminal with three different drivers was 64–117 loose m³ or 10.1–18.5 t of dry mass per productive hour (Table 7). In addition, 2.4–4.3 dry tonnes of residual biomass was produced. Although all the drivers were experienced and capable, the differences in productivity were great.
6. Five different chain types were studied in the flail. The average life time of the best (IB 20 NB of OFA Oy Ab) was roughly equivalent to the production of 250–300 dry tonnes of pulp chips (Table 8). The cost of chains was then 1.48 FIM/m³ loose or 9,12 FIM/tonne of dry mass produced. Keeping the expenditure on chains down is important for the cost competitiveness of the method (Figs. 13 and 14).
7. Since a simultaneous study by Metsäteho will report separately on the cost of the product, the present study does not include an economic evaluation. However, the experience of Enso Gutzeit Oy shows a cost reduction of 15–20 FIM/m³ solid or 55–75 FIM/t of dry mass, as compared to the conventional operations.
8. A loose volume of clean pulp chips can be converted into a solid volume of unbarked stemwood in a landing pile by multiplying it by a conversion factor of 0.496. Correspondingly, a dry mass of pulp chips can be converted into a solid volume of unbarked stemwood in a landing pile by multiplying it by a conversion factor of 3.13.
9. Several Finnish and Swedish experiments have shown a 0–10 % growth reduction after complete recovery of crown mass in the first thinning of Scots pine. When trees are topped in the forest at a diameter of 7 cm, at least half of the crown mass of the logging removal is left at the site. Supposedly, compared to complete removal of crown mass, the growth loss is reduced accordingly.
10. Harvesting techniques based on the use of the flail delimiting-debarking-chipping principle still have a great development potential, especially in Europe where it was introduced only recently. For Finnish conditions, particular attention must be paid to the following aspects: better technical adaption of the method for small forest holdings, organizational improvement of the system, salvage of the processing residue for energy, improving the efficiency of debarking and reducing the chain cost.

METSÄNTUTKIMUSLAITOS — *THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*



Metsäntutkimuslaitos — *The Finnish Forest Research Institute*

Unioninkatu 40 A, SF-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308, telex 121298 metla sf

Ylijohtaja — *Director General*

Eljas Pohtila

Hallintojohtaja — *Administrative Director*

Tero Oksa

Tiedotuspäällikkö — *Head of Information*

Marja Ruutu

Metsäekologian tutkimusosasto — *Department of Forest Ecology*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Eero Paavilainen

Metsänkasvatuksen tutkimusosasto — *Department of Forest Production*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Jari Parviainen

Metsien käytön tutkimusosasto — *Department of Forest Resources*

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Risto Seppälä (Aarne Reunala)

Tutkimusasemat — *Research Stations*

Joensuu

Parkano

Kannus

Punkaharju

Kolari

Rovaniemi

Muhos

Suonenjoki

- No 793 Lähde, Erkki: Luontaisen kuusivaltaisen taimikon kehitys lehtomaisella kankaalla.
Development of *Picea abies*-dominated naturally established sapling stand.
- No 794 Rikala, Risto: Taimitarhalannoituksen vaikutus männyntaimien jälkikasvuun ja istutuksen jälkeiseen menestymiseen.
Effect of nursery fertilization on incidence of summer shoots and field performance of Scots pine seedlings.
- No 795 Petäjistö, Leena & Selby, J. Ashley: Piensahojen kehittämisedellytykset.
Small sawmill development possibilities.
- No 796 Gustavsen, Hans Gustav: Vähäpuustoisten männiköiden ja kuusikoiden kehitys.
Development of understocked pine and spruce stands.
- No 797 Saarsalmi, Anna, Palmgren, Kristina & Levula Teuvo: Harmaalepän ja rauduskoivun biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö energiapuuviljelmällä.
Biomass production and nutrient consumption of *Alnus incana* and *Betula pendula* in energy forestry.
- No 798 Ollonqvist, Pekka & Kajanus, Miika: Metsänomistajan taloudellisten tavoitteiden merkitys metsänuudistamistavan valinnassa.
Significance of private forest owners' economic goals in the forest stand regeneration decision.
- No 799 Penttinen, Markku: Tulos- ja kustannuslaskentamallien soveltuvuus yhteismetsätalouteen.
Applicability of profit and cost accounting models to jointly-owned forests.
- No 800 Pesonen, Mauno & Hirvelä, Hannu: Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa.
Thinning models based on profitability calculations for southern Finland.
- No 801 Mäkinen, Harri & Uusvaara, Olli: Lannoituksen vaikutus männyn oksikuuteen ja puuaineen laatuun.
Effect of fertilization on the branchiness and the wood quality of Scots pine.
- 1993
- No 802 Pesonen, Mauno, Jämsä, Jari & Hirvelä, Hannu: Harvennushakkuiden edullisuusvertailu metsälötasolla.
Profitability comparisons of thinnings at the forest holding level.
- No 803 Hakkila, Pentti & Kalaja Hannu: Ketjukarsinta ensiharvennusmännikön korjuuratkaisuna.
Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine.