

**Hake-, osapuu- ja puutavaralajimenetelmien  
taloudellisuus sellutehtaan puunhankinnassa**

**Vesa Imponen  
Sirkka Keskinen  
Antti Korpilahti  
Jussi Lemmetty  
Risto Lilleberg  
Olavi Pennanen  
Asko Poikela  
Tuomo Vuorenpää**

Metsätehon raportti 22  
23.4.1997

Konsortiohanke

Asiasanat: aines- ja energiapuun hankinta, harvennuspuun  
korjuumenetelmät, mäntykuitupuu

*Keywords: procurement of industrial and fuel wood,  
thinning methods, pine pulpwood*

*Summary in English*

© Metsäteho Oy

Helsinki 1997

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus toteutettiin Kauppa- ja teollisuusministeriön vuonna 1993 käynnistämän ja Jyväskylän Teknologiakeskus Oy:n koordinoiman bioenergian tutkimusohjelman projektina 110 ”Hake-, osapuu- ja puutavaralajimien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa” tutkittiin uusien kehittämistyön kohteena olevien ensiharvennuspuun korjuu-, kuljetus- ja puunkäsittelytekniikoiden taloudellisuutta jo käytössä oleviin perustekniikoihin verrattuna. Hanke oli luonteeltaan kokoava ja muiden tutkimusten tuloksia hyödyntävä. Samalla tuotettiin aineistoja sekä tuloksia useiden selvitysten tarpeisiin. Puuraaka-aineen ominaisuuksien ja erilaisten tekniikoiden välisiä riippuvuuksia tutkittiin mallintamalla sekä kokeellisesti. Lisäksi projektissa kehitettiin tutkimusmetodiikkaa metsäteollisuuden kuitupuun hankintaan ja käyttöön liittyvien ongelmien tarkasteluun.

Projektin toteutuksessa merkittäväksi haasteeksi muodostui tutkimusongelman laajuus ja moniulotteisuus. Metsätehon tietopohjan lisäksi tarvittiin muiden asiantuntijaorganisaatioiden osaamista. Professori Pentti Hakkilan ja Metsäntutkimuslaitoksen kanssa tehty ensiharvennuspuun ominaisuuksien hallintaan tähdännyt yhteistyö tuotti tuloksia. VTT Energia ja Oy Keskuslaboratorio (KCL) olivat keskeisiä yhteistyötahoja sellutehtaan massanvalmistuksen ja energiantuotannon ongelmia selvitettäessä.

Yhteistyössä Kymmene Oy:n kanssa tarkasteltiin vaihtoehtoisten ensiharvennuspuun hankintaketjujen taloudellisuutta ja mäntykuitupuun minimiläpimitan vaikutuksia. Metsänhoitaja Sixten Sunabacka Pohjanmaan Puu Oy:stä ohjasi selvityksen laadintaa. Enso Oy:n Karjalan hankinta-alue ja Enocell Oy järjestivät yhdessä Metsäntutkimuslaitoksen, Metsätehon ja Keskuslaboratorion kanssa ensiharvennusmännyn korjuu-, kuorinta- ja haketuskokeen, jonka tuloksia voitiin hyödyntää laskennallisissa tarkasteluissa. Ensossa kokeesta vastasivat maat. ja metsät. kand. Ahti Ullgren ja metsätalousinsinööri Tarmo Pesonen. Osahankkeet olivat verraten erillisiä, ja näkökulmat olivat osittain yrityskohtaisia. Nämä hankkeet kuitenkin tukivat yhdistettyjen ainespuun ja puupolttoaineen hankintatekniikoiden vertailua, kehittämistä ja tutkimusohjelman koordinointia.

Kauppa- ja teollisuusministeriön toimeksiantona tehtiin yhteistyössä VTT Energian ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion kanssa puupolttoaineen tuotantopotentiaalia koskeva osaprojekti. Ministeriössä hanketta ohjasivat teollisuusneuvos Pertti Härme ja ylitarkastaja Aimo Aalto. Tämän selvityksen tuloksia voitiin myös hyödyntää varsinaisessa tutkimustyössä. KTM:n pyynnöstä selvitettiin myös hakkuutähteiden hankintakustannuksia Energia-Ekono Oy:n biopolttoaineiden kilpailukyky selvitystä varten. Tulokset on raportoinut kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM:n tutkimuksia ja raportteja 99/1995, 26/1996).

Metsätehossa metsänhoitaja, kauppat. maist. Vesa Imponen toimi projektin vetäjänä ja tutkijat maat. ja metsät. lis. Antti Korpilahti, maat. ja metsät. kand. Jussi Lemmetty, maat. ja metsät. kand. Risto Lilleberg, metsänhoitaja, MSc Olavi Pennanen, maat. ja metsät. kand. Asko Poikela sekä maat. ja metsät. kand. Tuomo Vuorenpää osallistuivat hankkeen suunnitteluun ja vastasivat eri osaprojekteista. Systeemisuunnittelija Sirkka Keskinen käsitteli aineistot ja kehitti laskentamalleja.

Projektin rahoitus oli vuosina 1993 - 1996 yhteensä 1 710 000 markkaa, josta Bioenergian tutkimusohjelman osuus oli 1 000 000 markkaa. VTT Energia teki sellutehtaan energian tuotantoa koskevan osaselvityksen, ja KCL vastaavasti tutki ensiharvennusmännyn ominaisuuksia ja laski sellun tuotantokustannuksia alihankintatöinä.

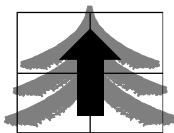
Helsingissä huhtikuussa 1997

Erkki Alalammi

## SISÄLLYS

<b>Kuvailusivut</b> .....	<b>6</b>
<b>1 PROJEKTIN TAUSTA</b> .....	<b>8</b>
<b>2 TAVOITTEET</b> .....	<b>8</b>
<b>3 TOTEUTUS</b> .....	<b>9</b>
<b>4 ENSIHARVENNUSPUUN TUOTANTOPOTENTIALIT</b> ....	<b>10</b>
<b>5 ENSIHARVENNUSMÄNNYN OMINAISUUDET JA KÄYTÖN KUSTANNUKSET</b> .....	<b>11</b>
5.1 Mäntykuitupuun minimiläpimitan vaikutus puunhankintaan ja sellunvalmistukseen .....	11
5.1.1 Tavoite.....	11
5.1.2 Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun tuotantokustannukset .....	12
5.1.3 Tarkastelu .....	13
5.2 Enocell Oy:n ensiharvennusmännyn korjuu-, kuorinta- ja keittokoe.....	14
5.2.1 Tavoite.....	14
5.2.2 Puu-, hake- ja massa-analysit .....	15
5.2.3 Sulfaattisellun tuotantokustannukset .....	18
5.2.4 Tarkastelu .....	20
5.3 Latvusmassamallit .....	20
5.3.1 Tavoite.....	20
5.3.2 Latvusmassajakauman kuvaaminen funktiolla.....	21
5.3.3 Puutavaralajimalli .....	23
5.3.4 Tarkastelu .....	24
<b>6 INTEGROIDUT KUITUPUUN JA PUUPOLTTOAINEEN TUOTANTOKETJUT</b> .....	<b>25</b>
6.1 Peterson Pacific - haketusketjun optimointi .....	25
6.1.1 Tavoite.....	25
6.1.2 Haketusketjun tehokas käyttö .....	25
6.1.3 Tarkastelu .....	28
6.2 Osapuunakorjuuseen perustuvat menetelmät sellutehtaan puunhankinnassa ja käsittelyssä .....	29
6.2.1 Tavoite.....	29
6.2.2 Vaihtoehtoisten menetelmien puunhankinta- ja sellunvalmistuskustannukset .....	29
6.2.3 Tarkastelu .....	32

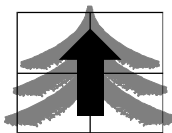
<b>7</b>	<b>ENERGIAPUUN HANKINTA TEOLLISUUDEN AINESPUUN HANKINNAN YHTEYDESSÄ KITTELÄN-SODANKYLÄN ALUEELLA .....</b>	<b>33</b>
7.1	Tavoite .....	33
7.2	Integroidun kuitu- ja energiapuun hankinnan taloudellisuus .....	34
7.3	Tarkastelu .....	36
<b>8</b>	<b>ENSIHARVENNUSPUUN KORJUU OSANA HANKINTA-ALUEEN TOIMINTAA .....</b>	<b>36</b>
8.1	Tavoite .....	37
8.2	Osapuunahankinnan kokonaiskustannusvaikutukset .....	37
8.3	Tarkastelu .....	39
<b>9</b>	<b>JATKOTOIMENPITEET .....</b>	<b>40</b>
<b>10</b>	<b>JULKAISUT JA VIITEKIRJALLISUUS .....</b>	<b>41</b>



# BIOENERGIA

BIOENERGIAN TUTKIMUSOHJELMA  
BIOENERGY RESEARCH PROGRAMME

Julkaisija		Projektin tunnus/projektinnumero	Paikka ja päiväys
METSÄTEHO OY PL 194 00131 Helsinki		Bioenergia 110	Helsinki 28.8.1996
Tekijä(t)		Toimeksiantaja(t)	
Vesa Imponen	Risto Lilleberg	Bioenergian tutkimusohjelma	
Sirkka Keskinen	Olavi Pennanen		
Antti Korpilahti	Asko Poikela		
Jussi Lemmetty	Tuomo Vuorenpää		
Projektin nimi			
Hake-, puu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa			
Raportin nimi			
Hake-, osapuu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus sellutehtaan puunhankinnassa			
Tiivistelmä			
<p>Ensiharvennushakkuiden osuus koko maan yksityismetsien hakkuumahdollisuuksista on alueellisten suunnitelmien mukaan 13 %. Pääosa ensiharvennuksista kohdistuu mäntyvaltaisiin metsiin. Mäntykuitupuun hakkuusuunnitteesta ensiharvennuspuun osuus on 29 %. Pienikokoinen mänty ei ole kuitenkaan ollut haluttua sellun raaka-ainetta korkeiden tuotantokustannusten ja järempään havupuuhun verrattuna huonompien kuituominaisuuksien vuoksi. Tämän vuoksi tutkimus- ja kehittämistyötä on ollut järkevää suunnata pieniläpimittaisen puun ja varsinkin ensiharvennusmännyn hankinnan, käsittelyn ja käytön alueille.</p> <p>Kuidutus ja polttokäyttö ovat molemmat kysymykseen tulevia vaihtoehtoja pieniläpimittaisen havupuun hyödyntämisessä. Yhdistetyt ainespuun ja puupolttoaineen hankintamenetelmät parantavat harvennuspuun käytön kannattavuutta massanvalmistuksessa ja tehtaan energian tuotannossa. Menetelmät näyttävät olevan taloudellisia sellutehtaan puunhankinnassa jo vaihtoehtoisten polttoaineiden hintojen nykyisellä tasolla. Polttotekniikoiden kehittyminen ja tuotettavan sähkömäärän lisääminen parantavat osapuuna korjuuseen perustuvien menetelmien kilpailukykyä karsittua puuta tuottavaan tavaralajimenetelmään verrattuna. Myös EU:n direktiivien mukaisten entistä pitempien perävaunuyhdistelmien käyttöönotto alentaa karsimattoman ja vajaasti karsitun puun kuljetuskustannuksia</p>			
Avainsanat		Luokitus ja/tai indeksointi	
Aines- ja energiapuun hankinta Harvennuspuun korjuumenetelmät Mäntykuitupuun			
ISSN ja avainnimeke		ISBN	
Kokonaissivumäärä	Kieli	Hinta	Luottamuksellisuus
42	Suomi		Julkinen
Julkaisun jakaja (nimi ja osoite)		Lisätietoja	
Metsäteho Oy PL 194 (Unioninkatu 17) 00131 Helsinki		Vesa Imponen (09) 132 5243 Antti Korpilahti (09) 132 5242	



# BIOENERGIA

BIOENERGIAN TUTKIMUSOHJELMA  
BIOENERGY RESEARCH PROGRAMME

Publisher  METSÄTEHO OY PL 194 FIN-00131 Helsinki Finland		Project code/project number  Bioenergy 110	Date and place  Helsinki 28.8.1996
		Commissioned by  Bioenergy research programme	
Author(s) Vesa Imponen            Risto Lilleberg Sirikka Keskinen        Olavi Pennanen Antti Korpilahti        Askko Poikela Jussi Lemmetty         Tuomo Vuorenpää		Name of project The economy of chip, whole tree and short-wood methods in the pulpwood and fuelwood procurement of a pulp mill	
Title The economy of ship, tree section and short wood methods in the procurement of a pulp mill			
Abstract  <p>Regional forest management plans for Finland's private, non-industrial forestry indicate that first thinnings account for 13 % of the felling potential in these forests. The majority of first thinnings focus on pine-dominated stands. First-thinnings wood represents 29 % of the allowable cut consisting of pine pulpwood. However, small-diameter pine has not enjoyed great demand as raw material by the chemical pulp industry due to the high associated production costs and due to its inferior fibre properties when compared to large-sized softwood logs. Consequently, research and development work has been focused on the procurement, handling and usage of small-diameter wood, and especially of first-thinning pine.</p> <p>Both defibration and use as fuel are options when considering how to exploit small-diameter softwood raw material. Integrated procurement of industrial wood and wood fuel have improve the profitability of wood from thinnings in pulp manufacture and in energy generation at the mill. These methods would appear to be economic in regard to both the wood procurement of the pulp mill even at the present prices paid for alternative fuels. Advances in combustion technology and increased generation of electric power improve the competitiveness of methods based on the harvesting tree sections in comparison with the shortwood system yielding delimbed roundwood. The adoption of longer timber lorry-trailer combination as recognised by EU directives will have the effect of reducing the transportation costs for non-delimbed and partially delimbed wood.</p>			
Keywords Procurement of industrial and fuel wood Thinning methods Pine pulpwood		Classification	
ISSN series title		ISBN	
Pages 42	Language Finnish	Price	Confidentially
Distributed (name and address) Metsäteho Oy PL 194 FIN-00131 Helsinki    Finland		Further information Vesa Imponen    +358 9 132 5243 Antti Korpilahti +358 9 132 5242	

## 1 PROJEKTIN TAUSTA

Puunhankinnassa on jatkuvaa kehittämistarvetta harvennuspuun korjuussa, kuljetuksessa ja käsittelyssä, jotta pieniläpimittaisen puun käyttömahdollisuudet kuidutuksessa ja energian tuotannossa paranisivat. Erilaisten tekniikoiden ja menetelmien toimivuutta ja taloudellisuutta on tarkasteltava tuotantotoimintaa harjoittavien yritysten näkökulmasta.

Metsäteollisuuden raaka-aineen hankinnassa tuotantoketjut muodostuvat korjuu-, kuljetus- ja puunkäsittelyvaiheista, jotka siirtävät puuta käsittelypaikasta toiseen tai muuttavat puuraaka-aineen muotoa. Yksittäisten työvaiheiden erillinen kehittäminen ei johda kokonaisuuden kannalta edullisimpien tekniikoiden löytämiseen. Yhdistetyssä aines- ja energiapuun tuotannossa oksa- ja latvusmassan arvo polttoaineena vaikuttaa oleellisesti erilaisten tekniikoiden edullisuussuhteisiin.

Metsäteollisuuden energian tuotannossa puupolttoainetta on syntynyt ainespuun hankinnan ja puunkäsittelyn sivutuotteena. Tavaralajimenetelmää sovellettaessa polttoaine koostuu kuoresta ja puuhävikin kautta kertyvästä puuaineesta. Poltettavaa puumäärää voidaan lisätä käyttämällä karsimatonta puuta tuottavia koko- tai osapuumenetelmiä. Myös kuitupuun minimiläpimitan pienentäminen tavaralaji- tai osapuumenetelmän yhteydessä kasvattaa energiajakeen osuutta. Samalla kuitenkin hakkeen massa- ja kuituominaisuudet heikkenevät ja sellun valmistuskustannukset kasvavat. Ensiharvennuksissa käytettävien ns. integroitujen aines- ja energiapuun hankintamenetelmien edullisuuteen vaikuttavat luonnollisesti myös vaihtoehtoisten raaka- ja polttoaineiden hinnat.

## 2 TAVOITTEET

Projektin tavoitteena oli tutkia erilaisten yhdistettyjen aines- ja energiapuun tuotantomenetelmien taloudellisuutta massatehtaiden puunhankinnassa. Simulointi- ja optimointimallien avulla tarkasteltiin metsäteollisuuden näkökulmasta seuraavien menetelmien edullisuutta.

- Tavaralajimenetelmä, rumpukuorinta tehtaalla
- Osapuumenetelmä, rumpukuorinta tehtaalla
- Ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikköön perustuva hankinta
- Osapuumenetelmä, haketus ja hakkeen puhdistus tehtaalla
- Palstahaketus, hakkeen puhdistus tehtaalla



Erilaisten teknisten ratkaisujen taloudellisuutta tutkittiin järjestelmätasolla ottaen huomioon puunhankinta-, puunkäsittely- ja massanvalmistusvaiheet sekä tehtaan energian tuotanto. Hankkeessa tehtiin bioenergian tutkimusohjelman ja metsäteollisuusyritysten käyttöön tuotantoketjujen vertailulaskelmia. Lisäksi selvitettiin Kauppa- ja teollisuusministeriön toimeksiantona lääneittäiset puupolttoaineen tuotantopotentialit yhteistyössä Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion ja VTT Energian kanssa.

### 3 TOTEUTUS

Projektissa tutkittiin ja vertailtiin sellutehtaan tuotannon kannalta uusia ensiharvennuspuun hankintaketjuja mallitarkasteluihin perustuen. Tutkimuksessa otettiin huomioon puun hyödyntäminen jäteliemipolttoaineena ja kiinteää puuainetta käyttävän polttolaitoksen energianlähteenä. Tuotantovaiheiden ja puun ominaisuuksien mallintamisessa käytettiin tutkimusohjelman muiden projektien tuottamia perustietoja. Lisäksi ensiharvennuskannan laatua ja käsittelyn vaikutuksia koskevaa tietopohjaa parannettiin Enocell Oy:ssä ja Enson Karjalan hankinta-alueen ensiharvennustyömailla tehdyillä kokeilla. Osaprojekteissa yhteistyökumppaneina olivat Metsäntutkimuslaitos, Oy Keskuslaboratorio, VTT Energia ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.

Hakkuiden rakenteen ja korjuuolosuhteiden selvittämistä varten hankittiin ja käsiteltiin kunnittaisia metsäsuunnitteluaineistoja. Korjuukohteiden puustoa kuvattiin runkolukusarjoilla, joita saatiin VTKK:n tallentamista vuoden 1990 laajoista pystymittaustiedoista. Metsäntutkimuslaitos antoi Metsätehon käyttöön latvusmassamallien laatimista varten 6 500 kaatokoepuun mittaus-tiedot.

Metsätehossa rakennettiin olio-ohjelmointikielellä ketjukarsinta-kuorinta-haketusketjun optimointiin soveltuva simulointimalli. Lisäksi alueellisia ja tehdaskohtaisia tarkasteluja varten kehitettiin lineaariseen ohjelmointiin perustuva hankintamenetelmien optimointimalli.

VTT Energian asiantuntemusta hyödynnettiin sellutehtaan energian tuotantoa koskevissa tarkasteluissa. Nämä tiedot yhdistettiin KCL:n sulfaattimassan valmistuskustannusmalliin. Kun tähän malliin edelleen liitettiin tuotantoketjuittaiset tuottavuus- ja kustannustiedot, voitiin mäntyselän tuotantoa analysoida kokonaisuudessaan ottaen huomioon puunhankinta-, puunkäsittely- ja sellunvalmistus- sekä energiantuotantovaiheet.

## 4 ENSIHARVENNUSPUUN TUOTANTOPOTENTIALIT

Valtioneuvoston keväällä sekä syksyllä 1993 eduskunnalle asettamassa selonteossa asetettiin tavoitteeksi bioenergian käytön huomattava lisääminen. Tähän liittyen kauppa- ja teollisuusministeriö käynnisti selvitystyön, ja ministeriön pyynnöstä huomattava osa tämän tutkimusprojektin resursseista suunnattiin puupolttoaineen tuotantomahdollisuuksien tutkimiseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio kokosi kunnittaisia hakkuumahdollisuuksia koskevan yksityismetsien hakkuusuunniteaineiston, joka työstettiin Metsätehossa SAS-ohjelmistolla laskennallisille jatkoanalyysille sopivaan muotoon. Tämän perustuksen pohjalta VTT Energiassa laskettiin hakkuutähteen ja ensiharvennuspuun polttokäyttöpotentiaalit (Helynen ja Nousiainen 1996).

Karsimattoman puun korjuu-, kuljetus- ja käsittelytekniikat soveltuvat parhaiten männylle. Koivu esiintyy kuitenkin usein sekapuuna, ja siitä saatava polttoaine on lämpöarvoltaan hyvää. Sen sijaan karsimattoman kuusen kuljetuskustannukset ovat korkeat. Lisäksi oksainen kuusi kuoriutuu huomattavasti nopeammin kuin mänty. Jos osapuumenetelmää ja 7 cm:n minimiläpimittaa sovelletaan pääosin mäntyä ja koivua tuottavissa yksityismetsien ensiharvennushakkuissa, vuotuinen puupolttoaineen lisätuotantopotentiaali olisi noin 0,9 milj. m<sup>3</sup> tavanomaiseen tavaralajimenetelmään verrattuna. Vastaava vuotuinen lisäpotentiaali olisi 5 cm:n minimiläpimittaa käytettäessä 1,2 milj. m<sup>3</sup>. Jos teollisuuden raaka-aineen hankinnan yhteydessä latvukset ja oksat korjataan talteen kokopuumenetelmällä, puupolttoaineen tuotantopotentiaali on noin 3,6 milj.m<sup>3</sup> vuodessa (liite).

Käytännössä puuntarjonta jää alhaisemmaksi kuin pitkän aikavälin puuntuotannolliset hakkuumahdollisuudet. Luonnonsuojelu sekä monimuotoisuutta edistävät uudet metsänkäsittelymenetelmät vähentävät korjattavissa olevan järeän puun määrää, ja ympäristönäkökulman edelleen korostuessa valikoivat hakkuut ja nuorten metsien harvennukset todennäköisesti yleistyvät. Koska samalla metsäteollisuuden kapasiteetti on jatkuvasti laajentunut, on todennäköistä, että ensiharvennuspuuta hankitaan aiempaa enemmän kuituraaka-aineeksi.

Ensiharvennusten osuus ainespuun hakkuusuunnitteesta vaihtelee lääneittäin 10 %:sta 19 %:iin. Suurin osa ensiharvennuskohteista on mäntyvaltaisia. Ensiharvennusmännyn osuus mäntykuitupuun hakkuumahdollisuuksista on kasvanut, ja se on maan eri osissa 23 - 36 %.

Pieniläpimittaisen männyn käyttö raaka-aineena on kallista ja siitä valmistetun massan kuituominaisuudet ovat heikommät kuin järeämmällä puulla. Tämän vuoksi ensiharvennuspuun hankintamenetelmien kehittämiseen ja käyttömahdollisuuksien parantamiseen suunnattu tutkimustyö on erityisen tarpeellista. Kun pieniläpimittaista puuta tarvitaan myös sellun raaka-aineeksi aiempaa enemmän, puuperäistä energiantuotantoa voidaan lisätä laajentamalla yhdistettyjen aines- ja energiapuumenetelmien käyttöä.

Kuusivaltaisten metsien hakkuutähte on kuitenkin edullisin puupolttoaine, ja sen vuotuinen tuotantopotentiaali yksityismetsistä on 3,6 milj. m<sup>3</sup> käytettäessä tavanomaisia hakkuutähteen korjuumenetelmiä (liite). KTM:n pyynnöstä tässä hankkeessa laskettiin myös eri kokoisille energian tuotantolaitoksille hakkuutähteen hankintakustannuksia, ja Energia-Ekono Oy käytti näitä kustannustietoja omassa biopolttoaineiden kilpailukykyä koskeneessa selvityksessään (Kosunen ja Leino 1995).

## **5 ENSIHARVENNUSMÄNNYN OMINAISUUDET JA KÄYTÖN KUSTANNUKSET**

### **5.1 Mäntykuitupuun minimiläpimitan vaikutus puunhankintaan ja sellunvalmistukseen**

#### **5.1.1 Tavoite**

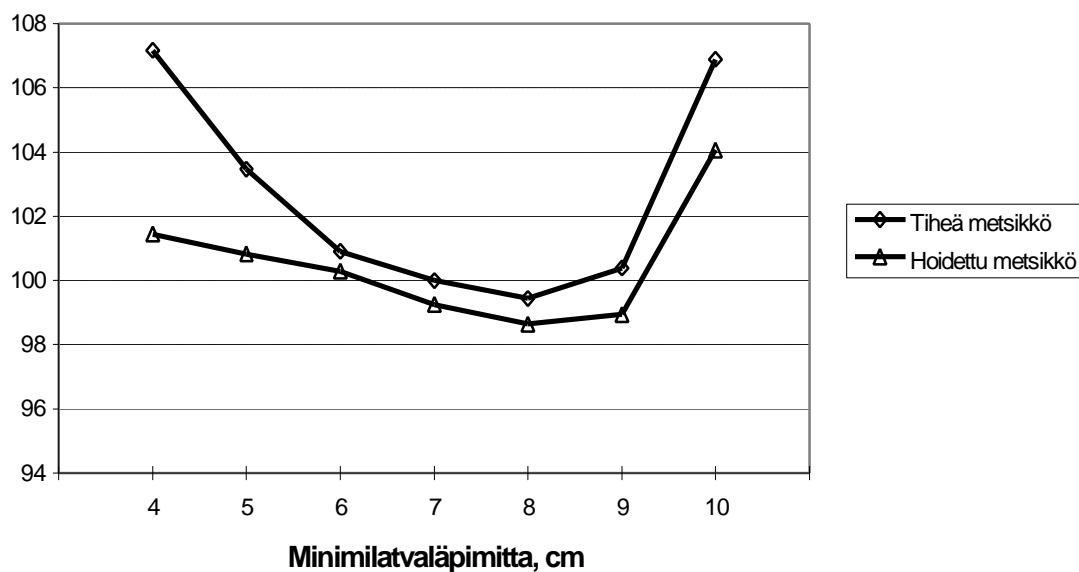
Rungoista saatavan kuitupuun ja myös oksamassan määrä riippuvat sovellettavasta minimiläpimitasta. Hakkuukertymä ja korjattavan puun mitat vaikuttavat hankinta- ja käsittelykustannuksiin. Kuoren osuus, puuaineen tiheys, kuidunpituus sekä oksaisuus vaihtelevat rungon eri osissa. Minimiläpimitan muuttaminen vaikuttaa näistä syistä myös massanvalmistuksessa puunkulutukseen, massan laatuun, sivutuotteiden määrään, energiataseeseen ja tuotantokustannuksiin. Puuraaka-aineen mittojen muutoksista aiheutuvia seurauksia ei ole kuitenkaan vielä toistaiseksi hallittu riittävän tarkasti ja kokonaisuudesta.

Tämä tutkimus tehtiin Metsätehon ja Keskuslaboratorion yhteistyönä, ja siinä selvitettiin minimiläpimitan vaikutusta sekä puunhankintaan että sellun tuotantoon (Korpilahti ym. 1995). Tutkimus tehtiin mäntykuitupuulle, ja se tuotti perustietoja integroitujen kuitupuun ja puupolttoaineen hankintamenetelmien tutkimista varten. Pelkästään puuaineen ominaisuuksien perusteella ei voida löytää edullisinta vähimmäisläpimittaa, vaan tarkasteluun on otettava mukaan puunhankinnan ja sellun tuotannon kustannukset sekä poltojakeen arvo.

Puunhankintaa ja sellun tuotantoa tarkasteltiin eri tyyppisillä ensiharvennusleimikoilla, käyttäen Metsätehossa olevaa tietopohjaa ja Keskuslaboratorion koetuloksia ja sulfaattimassan valmistuskustannusmalleja. Laskennallisia ajanmenekkitietoja tarkennettiin suppean hakkuun aikatutkimuksella.

### 5.1.2 Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun tuotantokustannukset

Vähimmäisläpimitan alentaminen pienensi tässä tutkimuksessa myös korjattavan rungon minimiläpimittaa. Tehdashinnan sisältävät sellun valmistuskustannukset muodostuivat sitä korkeammiksi mitä enemmän pienikokoisia puuta otettiin korjattaviksi. Hoitamattomassa, tiheässä esimerkkimetsikössä oli myös alamittaisia ( $d_{1,3} < 8$  cm) runkoja, mikä nostaa hankinta- ja jalostuskustannuksia. Lisäkustannukset hoidettuun metsikköön verrattuna kasvavat käytettävän minimiläpimitan pienentyessä (kuva 1).



**Kuva 1.** Suhteelliset sellun valmistuskustannukset erilaisilla ensiharvennusmänniköillä. Vertailuarvona (100) tiheä metsikkö, minimiläpimita 7 cm.

Mäntysellun valmistuskustannukset olivat edullisimmat 8 cm:n minimiläpimittaa sovellettaessa. Kustannukset olivat kuitenkin jokseenkin saman suuriset 6 - 9 cm:n vaihtoehdoilla (taulukko 1). Pienemmät vähimmäisläpimitat johtivat korkeampiin kokonaiskustannuksiin, samoin 10 cm:n vaihtoehto. Ensiharvennuksissa latvaläpimita vaikuttaa voimakkaasti hakkuutyön ja metsäkuljetuksen tuottavuuteen, koska hakkuukertymä vaihtelee voimakkaasti mittojen mukana. Järeämissä korjuukohteissa vastaavat vaikutukset ovat lievennät.

TAULUKKO 1

Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun kokonais-  
tuotantokustannukset. Arvot ovat suhteellisia, vertailu-  
perusteena 7 cm:n minimiläpimitan tilanne.

Erittely	Minimiläpimita, cm						
	4	5	6	7	8	9	10
Puun tehdashinta	105	101	100	100	101	104	116
Puunkulutus	106	104	102	100	98	96	94
Puuhäviö, %	3,5	3,0	2,3	1,9	1,3	1,2	1,0
<b>Sellunvalmistus- kustannukset</b>	<b>107</b>	<b>103</b>	<b>101</b>	<b>100</b>	<b>99</b>	<b>100</b>	<b>107</b>
Samoihin tuotanto- kustannuksiin johtava puun hinta	96	97	99	100	102	104	106

Sellun tuotanto ensiharvennuspuusta on huomattavasti kalliimpaa kuin myö-  
hempien harvennusten ja päätehakkuiden kuitupuusta. Kun mäntykuitupuuta  
hankitaan erilaisista hakkuukohteista, suhteelliset kokonaisvalmistuskustan-  
nukset ovat 7 cm:n vähimmäisläpimitää käytettäessä seuraavat:

Suhteelliset sellunvalmistuskustannukset  
(sisältävät tehdashinnan)

Mäntykuitupuuta ensiharvennuksista	125
Mäntykuitupuuta myöhemmistä harvennuksista	110
Mäntykuitupuuta päätehakkuista	100

Ensiharvennusmännyn käyttö raaka-aineena johtaa 25 % korkeampiin koko-  
naiskustannuksiin päätehakkuumännyn hankintaan ja jalostukseen verrattuna.  
Valmistuskustannukset myöhempien harvennusten mäntykuitupuuta raaka-  
aineena käytettäessä ovat jo selvästi alhaisemmat.

### 5.1.3 Tarkastelu

Tässä osatutkimuksessa tarkasteltiin vähimmäisläpimitan vaikutuksia puun-  
hankinnan ja sellun valmistuksen kustannuksiin aiempaa perusteellisemmin ja  
laaja-alaisemmin. Silti jouduttiin toteamaan että, mittojen optimointiin tarvi-  
taan vielä lisätutkimuksia. Ratkaisevaa kokonaiskustannusten kannalta on  
vähimmäisläpimitan lisäksi korjattavien runkojen minimikoko. Jos lat-  
väläpimitan aletessa samalla korjataan yhä pienempiä runkoja sekä hankinnan  
että sellun valmistuksen kustannukset alkavat nousta. Sen sijaan korjuukus-  
tannukset näyttäisivät jopa alenevan, kun minimirunkoa ei pienennetä nykyi-  
sestä.

Tulokset osoittavat myös, että latvahukkapuun talteenotto kokopuumenettelällä ei ole sellunvalmistuskustannusten kannalta perusteltava ratkaisu. Ohuen latvarunkopuun kuoripitoisuus kasvaa, tiheys alenee ja myös kuituominaisuudet alkavat heiketä 5 cm:iä pienempiin läpimittoihin mentäessä (Hakkila ym. 1995).

Joukkokäsittelyhakkuussa pienten runkojen käsittelyä voidaan tehostaa, mutta taakkoina katkaisussa latvaläpimittaa ei hallita tarkasti. Tämä vaikuttaa puuhävikkiin, hakkeen palakokojakaumaan ja massan kuituominaisuuksiin.

## **5.2 Enocell Oy:n ensiharvennuspuun korjuu-, kuorinta- ja keittokoe**

### **5.2.1 Tavoite**

Ensiharvennusmännyn korjuuta, rumpukuorintaa sekä massa- ja kuituominaisuuksia tutkittiin joulukuussa 1994 Enso Oy:n Karjalan hankinta-alueen omissa metsissä ja Enocell Oy:n sellutehtaalla Uimaharjussa (Imponen ym. 1997). Metsäteho teki korjuun aikatutkimukset. Metsäntutkimuslaitos tutki runkopuun hävikin ja hakkeen kuoripitoisuuden sekä palakokojakauman. Keskuslaboratorio teki puu-, hake- ja kuituanalyysit. Mittausten kohteena oli minimiläpimitan ja joukkokäsittelyhakkuun vaikutukset hakkeen laatuun ja massaominaisuuksiin. Koe tuotti myös ensiharvennusmännyn ominaisuus- sekä prosessitiedot, joita käytettiin tuotantoketjujen vertailussa tarvittavissa sellun valmistuskustannuslaskelmissa.

Pieniläpimittaisen ja paksumman ensiharvennuspuun oletettujen ominaisuuserojen esille saamiseksi 1 300 m<sup>3</sup> samoista kohteista korjattua ensiharvennusmäntyä lajiteltiin hakkuun yhteydessä kahteen järeysluokkaan: vähintään 9 cm paksut tyvi- ja välipölkyt omaksi eräkseen ja 5 cm:n minimiläpimitaan valmistetut latvapölkyt ja pienet tyvipölkyt toiseksi kuorintaeräksi. Minimiläpimita-osaprojektin tulosten mukaan korjuun kustannukset nousisivat, jos ohuempi runkopuu jätettäisiin hakkuutähteenä metsään. Sellunvalmistuksen kannalta huonompi pieniläpimittainen osite voidaan hyödyntää polttoaineena tai käyttää kuituna sille sopivissa tuotteissa.

Puunkäsittelyn tuottavuus ja kapasiteetti riippuvat raaka-aineen ominaisuuksista. Näitä riippuvuuksia ei kuitenkaan juuri tunneta, ja tiedot olisivat välttämättömiä erilaisten hankintamenetelmien ja tekniikoiden edullisuustarkasteluissa. Uimaharjun sellutehtaan kuorinnan optimointijärjestelmä tallentaa tärkeimpien kuorintaparametrien arvot minuutin välein. Alkuperäisen suunnitelman mukaan tätä pyrittiin hyödyntämään koetulosten analysoinnissa, mutta raaka-aineen vaikutuksesta kuorintakapasiteettiin saatiin tässä tutkimuksessa kuitenkin vain viitteitä, joita ei voitu ottaa huomioon kustannuslaskelmissa.

## 5.2.2 Puu-, hake- ja massa-analyysit

Tehtaan kuorimo on Kone Wood Oy:n toimittama. Rummun halkaisija on 5,5 m ja pituus 38 m, kuorinta tehdään kuivana. Haketus tehdään läpipurkavalla 16-teräisellä HQ 900 -hakulla. Rummussa syntyville pätkille on erillinen pystysyöttöinen 6-teräinen BCR 16 -pätkähakku. Kuorintaoloja ei vakioitu, vaan erät ajettiin tehtaan puunkäsittelyn läpi pyrkien normaaliin kuorintatuloon. Eräkoot olivat 570 - 664 m<sup>3</sup> (Hakkila ym. 1995). Yhden erän käsittelyaika oli noin 3 tuntia.

Pölkkyjen eräkohtainen keskipituus oli 392 - 438 cm. Erästä 2 tuli suunnitelmista poiketen lähes toisto erälle 1, koska otoksella mitattu toteutunut keskimääräinen minimiläpimita oli molemmissa tapauksissa sama 9 cm (taulukko 2). Korjuun aikatutkimusaineistot muodostivat osan kuorintaeristä, ja niitä kerätessä puutavara valmistettiin täysin suunnitelmien mukaisesti.

Päätehakkuuerän puuhäviö oli pienin, 1 %. Häviö oli suurin joukkokäsitellyn erän kuorinnassa, ja se oli selvästi havaittavissa kuorintahihnalta. Tässä kokeessa, jossa tavoiteläpimitana oli 5 cm, hävikki oli 4,2 %. Aiemmassa Uimaharjun kokeessa, jossa pyrittiin valmistamaan joukkokäsitelty puu 7 cm:iin, hävikki oli 3,0 % (Hakkila ym. 1995). Vaikka ensiharvennuspuun hävikit osoittautuivat suuremmiksi kuin päätehakkuuun, voidaan eroja pitää varsin kohtuullisina ainakin yksinpuin korjuun osalta.

TAULUKKO 2 Runkopuun hävikki ja hakkeen kuoripitoisuus rumpukuorintakokeessa. Näyte-erät 4 ja 5 lajiteltiin samoista korjuukohteista metsässä. Puuhäviö, kuoripitoisuus ja energijakeen osuus on määritetty kuivamassasta (Hakkila ym. 1995).

Mänty-kuitupuunäyte	Puutavaran valmistus	Tavoite-minimi läpimita, cm	Otoksella mitattu minimiläpimita, cm	Runkopuun häviö, %	Hakkeessa kuorta, %	Energijakeen osuus, %
0 Päätehakku, referenssi	Yksinpuin	7	12,9	1,00	0,17	6,6
1 Ensiharvennus	Yksinpuin	7	9,0	1,39	0,35	9,5
2 Ensiharvennus	Yksinpuin	5	9,0	1,96	0,24	8,9
3 Ensiharvennus	Joukkona	5	7,2	4,18	0,14	13,0
4 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	11,8	1,08	0,34	8,6
5 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	6,3	2,44	0,27	9,6

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

Tutkimuksessa ei vakioitu kuorintaoloja, vaan käyttöhenkilökunta ajoi prosessia pyrkien normaaliin kuorintatulokseen. Käytännössä se johti koe-erien välisiin ajotapaeroihin. 5 cm:iin valmistetut latvat ja niiden kanssa samassa erässä olevat pienet tyvet sekä joukkokäsitelty puu poikkesivat selvimmin päätehakkuupuusta. Ohuen puun erät kuorittiin pienemmällä rummun kierrosluvulla, ja rummun sulkuportti oli ylempänä kuin referenssiajossa. Kokeen aikana ei ollut mahdollisuutta varsinaiseen kuorintaolojen optimointiin, eikä tuloksista voitu arvioida luotettavasti koe-erien välisiä kuorintakapasiteetin eroja.

Koska koe-erät ajettiin peräkkäin, hakun terien terävyys vaihteli kokeen aikana tavanomaisissa rajoissa. Referenssinäytteellä terillä oli haketettu noin 2 000 m<sup>3</sup>, kun normaali vaihtoväli on noin 4 000 m<sup>3</sup>. Terien terävyys ei merkittävästi vaikuta haketustulokseen terien normaalin vaihtomenettelyn puitteissa.

Päätehakkuupuusta syntyi haketuksessa palakokojakaumaltaan paras hake (taulukko 3). SCAN-menetelmän mukaisessa seulonnassa sillä oli suurin hyväksytyjen jakeiden osuus 91 %. Jokaisen ei-toivotun jakeen osuus oli koeeristä pienin. Erityisen paljon referenssistä poikkesivat 5 cm:iin valmistetut erät. Palakokojakaumien erot olivat odotettuja, sillä puun pienen läpimitan tiedetään jo sinänsä olevan haketuksen kannalta epäedullista. Pölkkyjen katkeilu rummussa huonontaa syntyvän hakkeen laatua edelleen, koska lyhyet pätkät suuntautuvat huonosti hakun syöttökidassa ja katkenneiden puiden päistä syntyy helposti tikkuja ja purua.

TAULUKKO 3 Hakkeen palakokojakauma KCL:n mittausten mukaan.  
Näyte-erät 4 ja 5 lajiteltiin samoista korjuukohteista metsässä.

Mänty- kuitupuunäyte	Puu- tavaran valmistus	Tavoite- minimi- läpimitta, cm	Yli- pitkä	Yli- paksu	Hyväk- sytty	Neula- hake	Puru
0 Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	0,0	3,9	91,4	4,0	0,7
1 Ensiharvennus	Yksinpuin	7	0,7	4,2	87,0	6,7	1,4
2 Ensiharvennus	Yksinpuin	5	0,2	5,5	87,0	6,1	1,2
3 Ensiharvennus	Joukkona	5	1,4	9,5	79,7	7,8	1,6
4 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	0,8	5,1	87,2	5,9	1,0
5 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	0,6	6,2	83,6	8,1	1,5



Referenssihakkeesta mitattu kuivatuoretiheys  $420 \text{ kg/m}^3$ , ja kuiva-ainepitoisuus 47 % olivat männylle tyypillisiä. Ensiharvennuspuun kuivatuoretiheys oli 3 - 10 % pienempi ja kuiva-ainepitoisuus 11 - 12 % pienempi kuin referenssin (taulukko 4). Tiheyserot eivät johtuneet pelkästään erilaisista korjuutekniikoista. Näytteen alkuperä (kasvupaikka MT) ja muita näytteitä kymmenen vuotta nuorempi ikä selittää pääosin joukkokäsittelytekniikalla korjatun näytteen 3 pienen tiheyden. Hakkilan ym. (1996) mukaan ensiharvennusmännyn keskimääräinen tiheys puolukkatyypillä on  $404 \text{ kg/m}^3$  ja mustikkatyypillä  $374 \text{ kg/m}^3$ . Nämä luvut ovat yhdenmukaisia tämän tutkimuksen näytteille 1, 2 (VT) ja 3 (MT) mitattujen tiheysarvojen kanssa.

Kutakin näytettä edustavalla hakkeella tehtiin sulfaattikeittoja pyörivissä vastuslämmitteisissä 15 litran keittimissä. Massojen tavoitekappalelukuna oli 25 - 28, ja keitot tehtiin tuoreilla hakkeilla. Valkaistuista ja jauhetuista massoista mitattiin paperitekniisiä ominaisuuksia.

Puun kulutukset laskettiin kuorellisiksi kiintokuutiometreiksi 90-prosenttisesti valkaistua sellutonnaia kohti (taulukko 4). Joukkokäsittelyn erän puunkulutusta lisäsivät suuri energiajakeen osuus sekä pieni tiheys, joka johtui näytteen nuoresta iästä ja kasvupaikasta. Kuituominaisuuksien erot vastasivat aikaisempia tuloksia. Ensiharvennusmänty ei ole soveliaain raaka-aine pitkäkuituisuutta ja repäisylujuutta edellyttävään armeerausmassan valmistukseen. Joukkokäsitelty nuori, viljavan kasvupaikan männikkö poikkesi muista harvennuseristä. Samoista korjuukohteista ja rungoista lajiteltujen erien 4 ja 5 väliset erot olivat verraten pienet. Tämä viittaa siihen, että pelkästään puun paksuus ei ole kovin tehokas kriteeri suhteellisen homogeenisen ensiharvennuspuun lajittelussa.

TAULUKKO 4 Puuaineen kuivatuoretiheys, suhteellinen puunkulutus ja massan ominaisuudet. Repäisylujuus interpoloitu vetoindeksiin  $70 \text{ Nm/g}$ .

Mänty-kuitupuunäyte	Puutavaran valmistus	Tavoite-minimiläpimitta, cm	Kuivatuoretiheys, $\text{kg/m}^3$	Suhteellinen puunkulutus	Kuidun pituus, mm	Repäisyindeksi, $\text{mNm}^2/\text{g}$
0 Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	420	100	1,97	15,8
1 Ensiharvennus	Yksinpuin	7	404	107	1,64	14,2
2 Ensiharvennus	Yksinpuin	5	406	106	1,60	13,4
3 Ensiharvennus	Joukkona	5	379	118	1,45	11,2
4 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	399	108	1,67	13,0
5 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	392	111	1,55	13,4

### 5.2.3 Sulfaattisellun tuotantokustannukset

Enso Oy:n Karjalan hankinta-alueen kaikkien koetyömaiden koneellisen hakkuun ajanmenekit selvitettiin koeruuduittain aikatutkimuksella. Tulokset yleistettiin tyypillisiä männikön ensiharvennusolosuhteita vastaavaksi. Minimiläpimitan pienentäminen paransi hakkuun tuottavuutta silloin, kun runkojen vähimmäiskoko pidetään ennallaan (taulukko 5).

TAULUKKO 5 Menetelmien väliset erot hakkuussa. Tulokset on interpoloitu keskimääräisiä ensiharvennuskorjuuolosuhteita vastaaviksi. Hakkuukertymä 41 m<sup>3</sup>/ha (680 r/ha).

Menetelmä	Suhteellinen tuotos	Suhteellinen kertymä	Kustannuserot, mk/m <sup>3</sup>
Yksinpuin 7 cm	100	100	0
Yksinpuin 5 cm	109	108	-3,7
Yksinpuin lajiteltuna 9/5 cm	109	108	-3,6
Joukkokäsittely 5 cm	117	110	-6,1

Aikatutkimus tehtiin korjuukohteilla rajatuilla ja mitatuilla koeruuduilla. Puutavaraa valmistettiin työntutkijan ohjaamana, ja esimerkiksi läpimittavaatimuksista pidettiin kiinni. Kokeellinen tulos minimiläpimitan vaikutuksista hakkuun kertymään ja tuottavuuteen vastasi simuloinnilla saatua tulosta tapauksessa, jossa minimirunkoa ei sallita pienennettävän nykyisestä 9 cm:n rinnankorkeusläpimittaluokasta. Hakkuun aikatutkimuksen tuloksissa oli mielenkiintoista myös se, että hakkuukoneella lajittelu kahteen eri pakkausluokkaan (9/5 cm) ei lisännyt puutavaran valmistuksen ajanmenekkiä.

Metsäntutkimuslaitoksen, Keskuslaboratorion ja Metsätehon tulokset yhdistämällä laskettiin puunhankinnan ja sellun valmistuksen kustannukset. Korjuuolosuhteet ja kuljetusetäisyys vakioitiin. Kantohinta oli kaikilla erillä sama. Näin saaduissa tuloksissa näkyy ensiharvennuskorjuun puuaineen ominaisuuksien sekä korjuu- ja puunkäsittelytekniikan vaikutus kokonaistuotantokustannuksiin. Sellun valmistuksen muuttuvat kustannukset laskettiin Keskuslaboratorion sulfaattimassan valmistuskustannusmallilla, ja tulokset vastaavat keskimääräisiä havusellun tuotantokustannuksia. Mallin tietoja ei muokattu vastaamaan Enocell Oy:n prosesseja. Laskelmat sisältävät kantohinnan, puunhankintakustannukset ja sellunvalmistuksen muuttuvat kustannukset.

TAULUKKO 6 Ensiharvennusemännystä valmistetun sellun kokonaistuotantokustannukset. Korjuuolosuhteet on vakioitu. Kuljetusmatka 80 km. Hankintakustannukset laskettiin kuutiometriä kohti ja sellun valmistuskustannukset tonnia kohti.

Mänty-kuitupuunäyte	Puu-tavaran valmistus	Tavoite-minimiläpimitta, cm	Suhteelliset korjuukustannukset	Suhteellinen tehdashinta	Suhteelliset kokonaistuotantokustannukset
0 Päätehakkuu, referenssi	Yksinpuin	7	100	100	100
1 Ensiharvennus	Yksinpuin	7	191	119	119
2 Ensiharvennus	Yksinpuin	5	180	117	117
3 Ensiharvennus	Joukkona	5	173	115	125
4 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	9	186	118	120
5 Ensiharvennus	Yksinpuin, lajittelu	5	186	118	121

Taulukossa 6 esitetyt kustannukset osoittavat puuaineen laadun merkittävän tuotantotaloudellisen vaikutuksen. Joukkokäsittely erän tehdashinta on alhaisin, ja tässä tapauksessa korkeat kokonaiskustannukset johtuvat raaka-aineen alhaisesta tiheydestä ja suuresta energiajakeen osuudesta. Joukkokäsittely harvennusemännystä oli iältään nuorempi ja kasvupaikaltaan viljavampi kuin muut kohteet, ja poikkeavat puuaineen ominaisuudet vaikuttavat vertailun tuloksiin.

Ensiharvennusemännystä valmistetun sellun kokonaistuotantokustannukset ovat 20 - 25 % kalliimmat, jos sille maksettaisiin sama kantohinta kuin muulle mäntykuitupuulle. Käytännön puukaupassa tämä kustannusero vaikuttaa ensiharvennusemännystä maksettavaan hintaan. Korjuutekniikkaa ja puunkäsittelyä kehittämällä voidaan kuitenkin vaikuttaa pieniläpimittaisen puun hyödyntämismahdollisuuksiin.

## 5.2.4 Tarkastelu

Toistaiseksi on oletettu, että runkojen tai pölkkyjen läpimitta olisi käytännössä toimiva kuitupuun ominaisuuksien selittäjä. Männyllä puiden ikä korreloi kuituominaisuuksien kanssa, ja tämä ilmeisesti tasoitti läpimitan perusteella lajiteltujen näyte-erien ominaisuuksia. Ohuemmat pienemmät puut olivat yhtä vanhoja kuin vallitsevan latvuskerroksen suuremmat puut.

Nopeasti kasvaneiden, viljavien kasvupaikkojen männiköiden puuaine on ensiharvennusvaiheessa kalleutensa ja nykyisten tuotteiden kannalta epäedullisten kuituominaisuuksiensa vuoksi vähemmän haluttua sellun raaka-ainetta. Jos kuitupuuta saadaan muuten riittävästi, sopisi näistä hakkuista korjattava puu hyvin polttoaineeksi.

Joukkokäsittelyhakkuun vaikutusta kuituraaka-aineen ominaisuuksiin ei saatu aukottomasti selvitettyä tällä kokeella. Olisi tarpeellista tehdä tutkimus, jossa vakioitaisiin mahdollisimman pitkälle puuston ominaisuudet, ja joukkokäsittelyllä valmistettaisiin homogeenisesta raaka-aineesta vaihtoehtoisin minimiläpimittoihin tehtyä puutavaraa.

Enocell Oy:n tehdasmittakaavainen koe tuotti ensiharvennuskasvun ominaisuuksista ja korjuutekniikan sekä puunkäsittelyn vaikutuksista tietoja, jotka suoraan hyödynnettiin erilaisten integroitujen kuitu- ja puupolttoaineen tuotantoketjujen taloudellisuuden tarkastelussa. Tästä kokeesta saadut tiedot sijoitettiin Keskuslaboratorion sulfaattimassan valmistuskustannusmalliin vaihtoehtoisten ensiharvennuspuun hankintaketjujen kilpailukykyä analysoitaessa.

## 5.3 Latvusmassamallit

### 5.3.1 Tavoite

Karsimatonta puuta tuottavien hankintamenetelmien ja tekniikoiden T&K-työssä on ilmennyt tarvetta latvusmassan pituussuuntaista jakaumaa kuvaavan mallin laatimiselle. Erilaisten koko- ja osapuumenetelmien kustannus- ja tuottavuusvertailut edellyttävät riittävän luotettavaa tietoa siitä, kuinka suuri osa oksista jää rungon käyttöosaan sekä vastaavasti latvakappaleeseen. Pituussuuntaista jakaumaa kuvaavan mallin on oltava joustava ja jatkuva. Sen avulla on voitava tuottaa estimaatti latvusmassakertymälle millä tahansa rungon osakorkeudella.

Metsäteho sai mallin laadintaa varten käyttöönsä Metsäntutkimuslaitoksen kokoaman aineiston, joka sisältää puulajeittain maantieteellisesti kattavan 6 500 kaatokoepuun mittaustiedot (Poikela 1996). Koepuista tunnetaan mm. kunkin 2 metrin osavälin sisältämä oksien ja neulasten kokonaiskuivapaino. Tässä tutkimuksessa mallinnettiin elävien oksien kuivamassan (puuaines + kuori + havupuun neulaset) pituussuuntaista yhteisjakaumaa. Kuolleiden oksien kuivamassaa ei huomiota lainkaan.

### 5.3.2 Latvusmassajakauman kuvaaminen funktiolla

Tutkimuksessa etsittiin mahdollisuutta latvusmassan pituussuuntaisen jakauman kuvaamiseen Weibull-funktiolla. Tällä funktiolla on mahdollista kuvata jakauma ja sitä vastaava kertymä kahden tai kolmen parametrin avulla. Latvusmassan pituussuuntaisen jakauman mallintamisessa on kyse näiden parametrien mahdollisimman tarkasta estimoinnista eri tasoisten (puu/puusto) muuttujien avulla.

Weibull-jakauma kuvataan kolmella parametrilla. Sijaintiparametrilla (a) esitetään muuttujan (x) minimiarvo. Muotoparametri (c) kuvaa jakauman vinoutta ja skaalausparametri ( $\sigma$ ) jakauman hajontaa:

$$f(x) = \frac{c}{s} ((x-a)/s)^{c-1} e^{-((x-a)/s)^c} \quad (\text{jakaumafunktio})$$

$$F(x) = 1 - e^{-((x-a)/s)^c} \quad (\text{kertymäfunktio})$$

$c \leq 1,1$	(laskeva jakauma)
$1,1 < c < 3,6$	(vasemmalle vino jakauma)
$c = 3,6$	(lähes symmetrinen jakauma)
$c > 3,6$	(oikealle vino jakauma)

Weibull-funktion erityisominaisuutena voidaan mainita mm. se, että jakauma- ja kertymäfunktio voidaan johtaa toisistaan analyttisesti integroimalla tai derivoimalla. Weibull-funktiolla voidaan kuvata hyvin erilaisia jakaumia. Joustavuutta on etenkin muuttujan minimiarvon läheisyydessä. Funktio voidaan sovittaa empiiriseen jakaumaan estimoimalla parametrit esim. epälineaarilla regressioanalyysillä tai maximum likelihood -menetelmällä.

Tässä tutkimuksessa sovitukset toteutettiin rungoittain pienimmän neliösumman menetelmällä. Funktion muuttujana (x) käytettiin suhteellista etäisyyttä latvan kärjestä.

Weibull-jakauman parametrit kuvattiin seuraavilla regressiomalleilla:

muotoparametri c:		R <sup>2</sup>
mänty:	$-18,074 + 3,8596 \cdot \ln LP + 297,7 / LP$	0,21
kuusi:	$-2,3210 + 0,69484 \cdot \ln D + 154,35 / H$	0,23
koivu:	$-4,9988 + 1,3145 \cdot \ln D + 156,18 / LP$	0,10

LP = latvuksen pituus, dm  
D = rinnankorkeusläpimitta, mm  
H = puun pituus, dm  
LS = latvussuhde (LP/H)

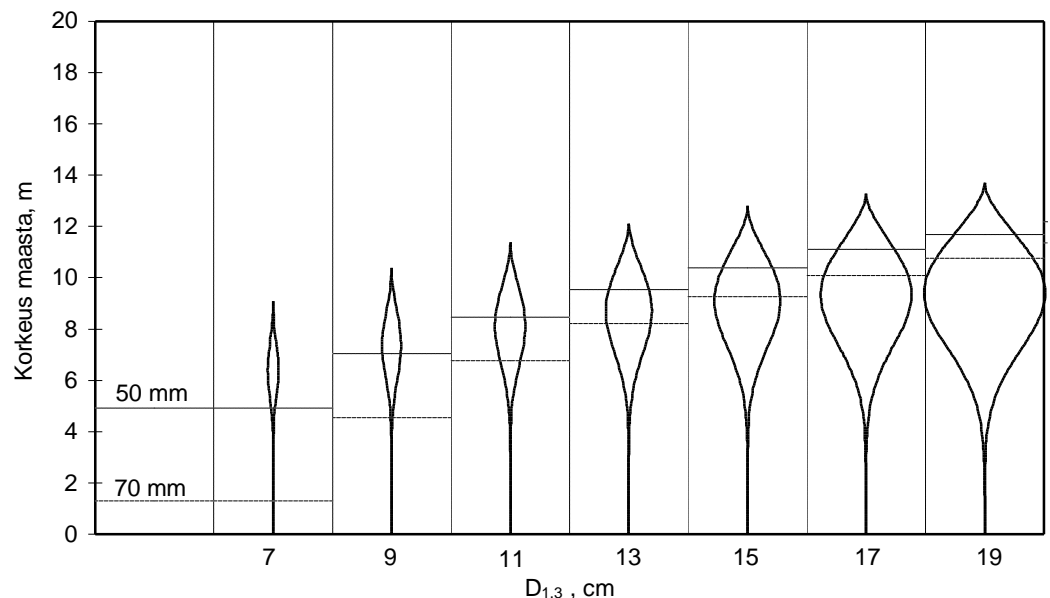
skaalausparametri $\sigma$ :		R <sup>2</sup>
mänty:	$0,01139 + 0,5557 \cdot LS + 3,13548 / H$	0,84
kuusi:	$0,41508 + 0,52798 \cdot LS^2 - 0,05527 \cdot \ln H$	0,77
koivu:	$0,102656 - 0,01809 \cdot (H/D)^2 + 0,53726 \cdot LS$	0,65

TAULUKKO 7 Latvusmassan rungoittaisen ja leimikoittaisen kertymän ennustevirhe (%-yksikköä) ja jäännöshajonta eri etäisyyksillä latvasta.

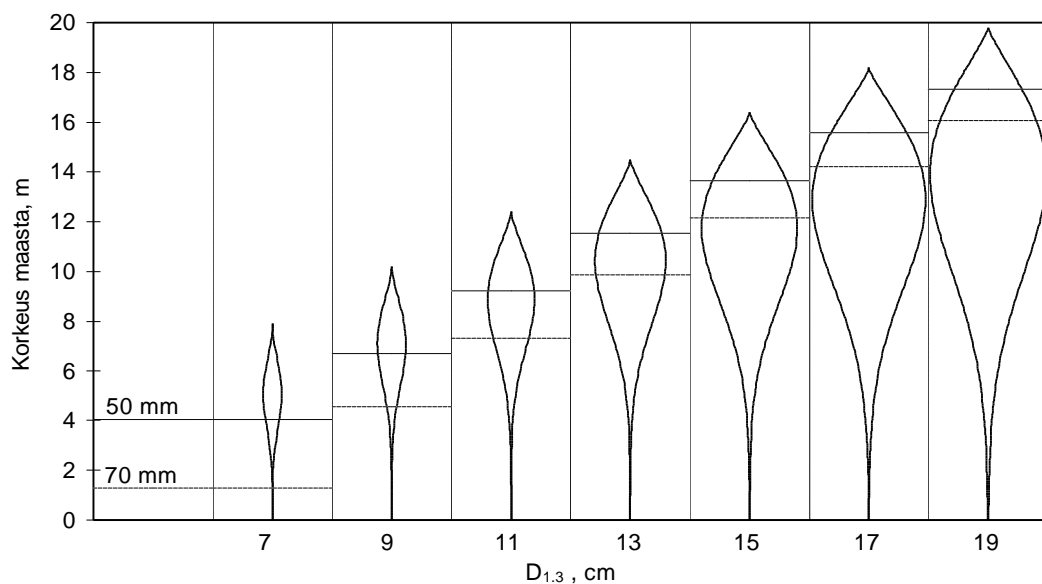
Etäisyys latvasta, m	Leimikko		Runko	
	Virhe	Jäännöshajonta	Virhe	Jäännöshajonta
2 - 4	0,20	3,16	0,35	11,44
4 - 6	1,41	3,41	1,21	9,82
6 - 8	1,25	3,32	0,63	7,09

Regressiomalliin perustuvilla Weibull-parametreilla tuotetut kertymäestimoot olivat jäännöshajonnalla mitattuna melko tarkkoja. Regressiomallilla ennustetut parametrit johtivat latvuksen keskivaiheilla latvakappaleeseen jäävän latvusmassan yliarvioon, joskin harha oli vain noin 1 %-yksikön luokkaa (taulukko 7).

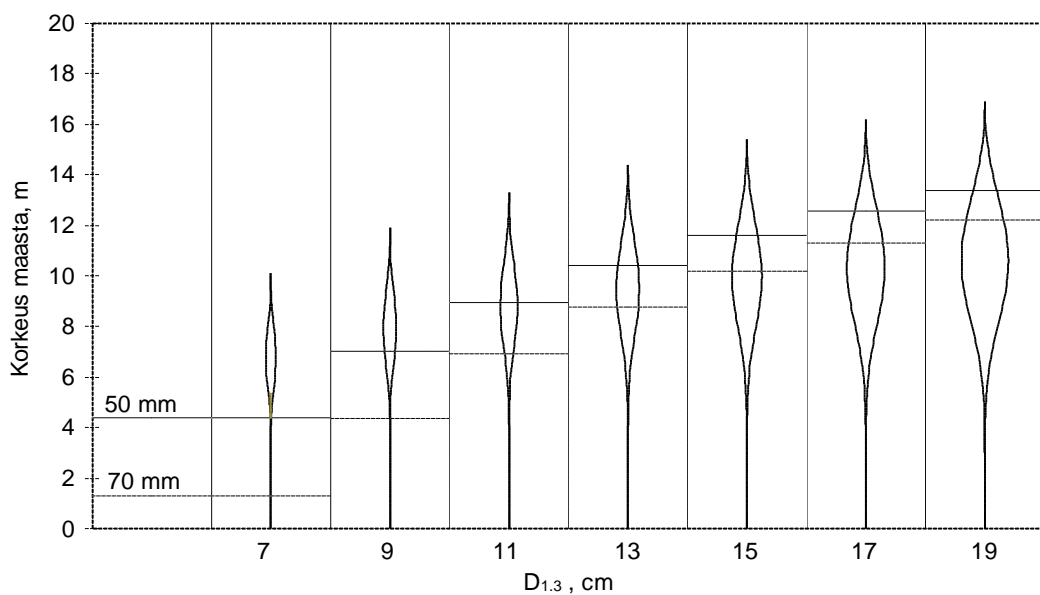
Sijoittamalla regressiomallin tuottamat parametrit ja muuttujan arvo Weibull-funktioon saadaan kullekin rungolle tai runkolukusarjan läpimittaluokalle yksilöllinen, puutunnuksiin perustuva latvusmassajakauma. Kuvissa 2, 3 ja 4 on esitetty aineiston kolmelle harvennusleimikolle regressiomallien avulla laaditut läpimittaluokittaiset latvusmassajakaumat, jotka on havainnollisuuden vuoksi painotettu elävän latvuksen kokonaiskuivamassalla ja jaettu rungon molemmille puolille. Kuvaajiin on merkitty myös Laasasenahon runkoikäymallin avulla määritettyjen tyyppillisten minimiläpimittojen sijainti.



**Kuva 2.** Elävän latvuksen massan pystysuuntainen jakauma ja eräiden katkaisuläpimittojen sijoittuminen siihen tyyppillisessä ensiharvennusmännikössä (ikä 30 vuotta, poistuman keski-järeys  $56,3 \text{ dm}^3/\text{r}$ ).



**Kuva 3.** Elävän latvuksen massan pystysuuntainen jakauma ja eräiden katkaisuläpimittojen sijoittuminen siihen tyypillisessä ensiharvenuskuusikossa (ikä 48 vuotta, poistuman keskijäreys 63,0 dm<sup>3</sup>/r).



**Kuva 4.** Elävän latvuksen (ilman lehtiä) massan pystysuuntainen jakauma ja eräiden katkaisuläpimittojen sijoittuminen siihen tyypillisessä ensiharvenuskoivikossa (ikä 35 vuotta, poistuman keskijäreys 61,2 dm<sup>3</sup>/r).

### 5.3.3 Puutavaralajimalli

Latvusmassamalleja voidaan käyttää yhdessä runkokäyrämallien kanssa, jolloin voidaan ennustaa poistumaan jäävä ja kertymään tuleva oksien määrä (kuvat 2 - 4). Projektissa kehitetty puutavaralajimallin prototyypisovellus

koostuu rungon läpimittaa, latvusmassaa, puuaineen tiheyttä, kosteutta ja kuoren osuutta kuvaavista yhtälöistä. Kuorimäärien laskenta on vielä selvittävänä. Tällä mallilla voidaan esimerkiksi tarkastella tavaralaji- ja osapuumenetelmien hakkuukertymän rakennetta ja ominaisuuksia, kun miniläpimittaa ja pölkyn pituutta muutetaan (taulukko 8).

TAULUKKO 8 Ensiharvennusmännikön hakkuukertymä osapuuna-  
korjuussa. Rungon vähimmäisrinnankorkeusläpimitta-  
luokka 9 cm. Poistettavia puita 680 r/ha.

Vähimmäis- läpimitta, cm	Runkopuun hakkuukertymä, m <sup>3</sup> /ha	Oksamassan hakkuukertymä, m <sup>3</sup> /ha	Osapuuna- korjuun lisäkertymä- kerroin
5	42,4	7,5	1,18
6	41,3	5,5	1,13
7	39,4	3,8	1,10

### 5.3.4 Tarkastelu

Latvusmassamalli on yksi työkalu siinä työkalupakissa, jolla hallitaan puuston biomassakomponenttien määrä erilaisilla käsittelymenetelmillä. Käyttöosaan jäävän latvusmassan estimointiin tarvitaan nyt laaditun mallin lisäksi runko-  
kohtaisen elävän latvuksen kokonaisuuden ennustava malli (Hakkila 1991). Mikäli käyttöosan ja latvahukkapuun rajapinta määräytyy minimiläpimitan perusteella tarvitaan lisäksi tieto siitä, millä osakorkeudella kyseinen läpimitta sijaitsee. Tämä muuttuja voidaan ratkaista esimerkiksi Laasasenahon runko-  
käyrämallin avulla. Leimikkokohtaisen kokonaislatvusmassan tarkka estimointi edellyttää tietoa myös elävän latvuksen alarajan sijainnista. Mikäli mitattua tietoa ei ole saatavissa, joudutaan myös tämä muuttuja estimoimaan. Tuloksia voidaan tällöin soveltaa lähinnä leimikkotyypikohtaisesti; ei niinkään leimikkokohtaisesti.

Useimmissa korjuumenetelmissä valtaosa jalostukseen ohjattavasta puuraaka-  
aineesta on runkopuuta. Sen määrä todetaan yleensä dimensioiden perusteella, vaikka massan ja erityisesti polttoraaka-  
aineen jalostusketjussa runkopuun kuivamassa on tilavuussuureita merkittävämpi saantoa (MWh, sellutonne) ajatellen. Jatkotutkimuksessa selvitetään mahdollisuuksia kuvata matemaattisesti rungon eri osien tiheys- ja kosteusvaihtelun lisäksi kuitujen ominaisuuksia. Näiden puuaineen käytön kannalta tärkeiden ominaisuuksien mallintaminen on aloitettu männystä, koska sitä koskevat tutkimustiedot ovat verraten kattavia.



## 6 INTEGROIDUT KUITUPUUN JA PUUPOLTTO- AINEEN TUOTANTOKETJUT

### 6.1 Peterson Pacific -haketusketjun optimointi

#### 6.1.1 Tavoite

Ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikköön perustuvassa haketusketjussa puut karsitaan, kuoritaan ja haketetaan samalla koneyksiköllä, joka puhaltaa hakkeen aumaan tai kuorma-auton kuormatilaan. Menetelmällä voidaan tuottaa sekä selluhaketta että polttokäyttöön soveltuvaa oksa- ja kuorimursketta.

Metsäteho selvitti Peterson Pacific -ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikön tuottavuutta ja kustannuksia (Vuorenpää 1996) ja Metsäntutkimuslaitos haketuksen raaka-ainetasetta sekä hakkeen ja murskeen käyttöominaisuuksia (Hakkila ym. 1995). Ketjukarsintakuorintaketju on tyypillinen ”kuuma ketju”, jossa jonkin työnvaiheen hidastuminen hidastaa myös muita työnvaiheita. Tämänkaltaisen dynamiikan, mm. hakkuutyömaiden valinnan ja ketjutuksen sekä autojen määrän ja aikataulutuksen vaikutuksia haketusketjun tuottavuuteen ei ole selvitetty aiemmissa tutkimuksissa.

Simuloinneissa tehdään monimutkaisten systeemien toimintaa jäljitteleviä kokeita matemaattisilla malleilla jonkin aikavälin aikana. Simuloinnilla saatu ratkaisu ei koskaan ole tarkka, mutta useimmiten menetelmä on riittävän tarkka käytännön tarpeisiin. Usein simulointia joudutaan käyttämään tilanteissa, joissa ongelman dynaamisuuden, stokastisuuden tai epälinearisuuden takia todellisuutta kuvaavaa mallia on hankala esittää ja käsitellä matemaattisessa muodossa.

Kuumissa ketjuissa, kuten haketusketjussa, yhden koneen keskeytykset näkyvät usein koko ketjun toiminnassa. Analyttisillä lähestymistavoilla tämänkaltaisen vaihtelun merkitystä korjuuketjun tuottavuuteen ja kustannuksiin on hankala määrittellä. Riittävän aineiston kerääminen vaikutusten laskemiseksi olisi erittäin työlästä. Vaihteluiden merkitystä pystytään tehokkaasti analysimaan simulointimallilla tehtävillä kokeilla, joilla voidaan jäljitellä korjuuketjussa esiintyvää satunnaisuutta.

#### 6.1.2 Haketusketjun tehokas käyttö

Tässä tutkimuksessa käytettiin vuosina 1992 - 1993 kerättyä aikatutkimusaineistoa, josta pystyttiin erottamaan simulointimalliin tarvittut työnvaiheet. Laskennalla haluttiin selvittää hakkuriin perustuvan haketusketjun kustannukset hyvissä olosuhteissa, minkä vuoksi aineistoon tehtiin seuraavat rajaukset.

- Kuljettajalla oli kokemusta hakkurin käytöstä
- Tarkasteltiin vain mäntyosapuuta
- Pinon päällä ei ollut runsaasti lunta

Simulaattorissa käytettiin seuraavia työvaiheita hakkurille ja hakeautolle:

#### **Hakkurin työvaiheet**

Valmistelu ennen haketusta  
 Alle 15 min:n keskeytykset ennen haketusta  
 Yli 15 min:n keskeytykset ennen haketusta  
 Siirtymiset ennen haketusta  
 Valmistelu haketuksen aikana  
 Alle 15 min:n keskeytykset haketuksen aikana  
 Yli 15 min:n keskeytykset haketuksen aikana  
 Siirtymiset haketuksen aikana  
 Haketus (tehoaika)  
 Valmistelu haketuksen jälkeen  
 Alle 15 min:n keskeytykset haketuksen jälkeen  
 Yli 15 min:n keskeytykset haketuksen jälkeen  
 Siirtymiset haketuksen jälkeen  
 Siirrot  
 Lepo

#### **Hakeauton työvaiheet**

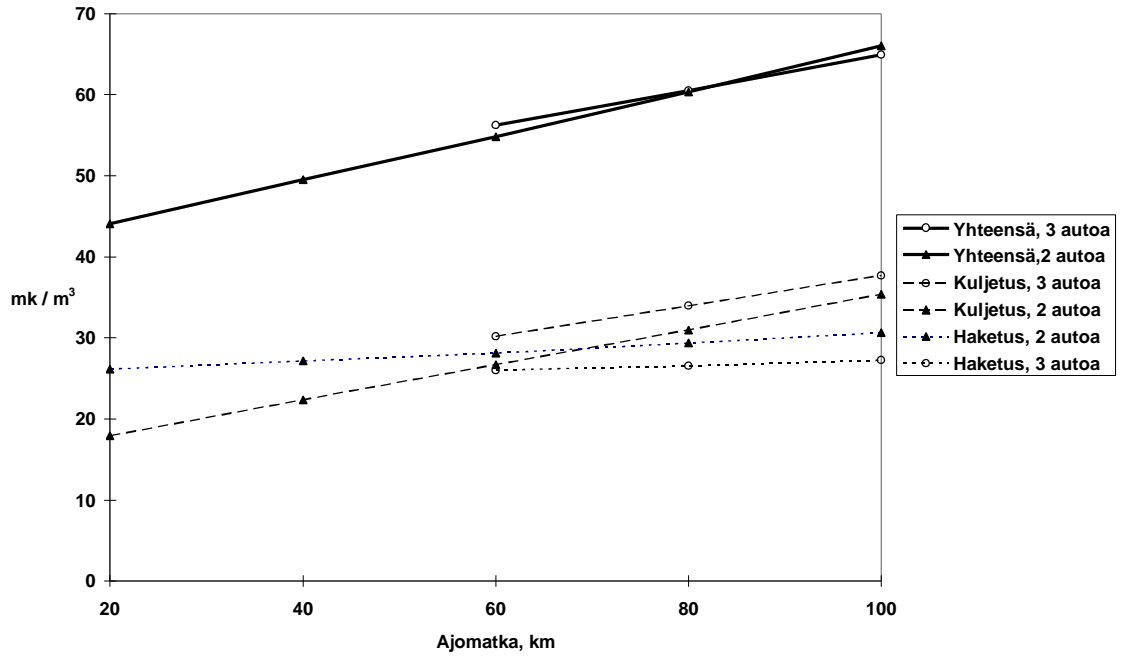
Ajoaika tyhjänä  
 Kuormauksen valmistelu  
 Hakkurin odotus  
 Valmistelu hakkurityön aikana  
 Keskeytykset hakkurityön aikana  
 Siirtymiset hakkurityön aikana  
 Haketus (tehoaika)  
 Ajon valmistelu  
 Ajoaika kuormattuna  
 Jonotus tehtaalla  
 Mittausaika  
 Purku aika  
 Lepo

Kustannustietoina käytettiin Pertti Szepaniak Oy:n kirjanpitoon perustuvia kustannustietoja. Niihin tehtiin seuraavia lisäyksiä:

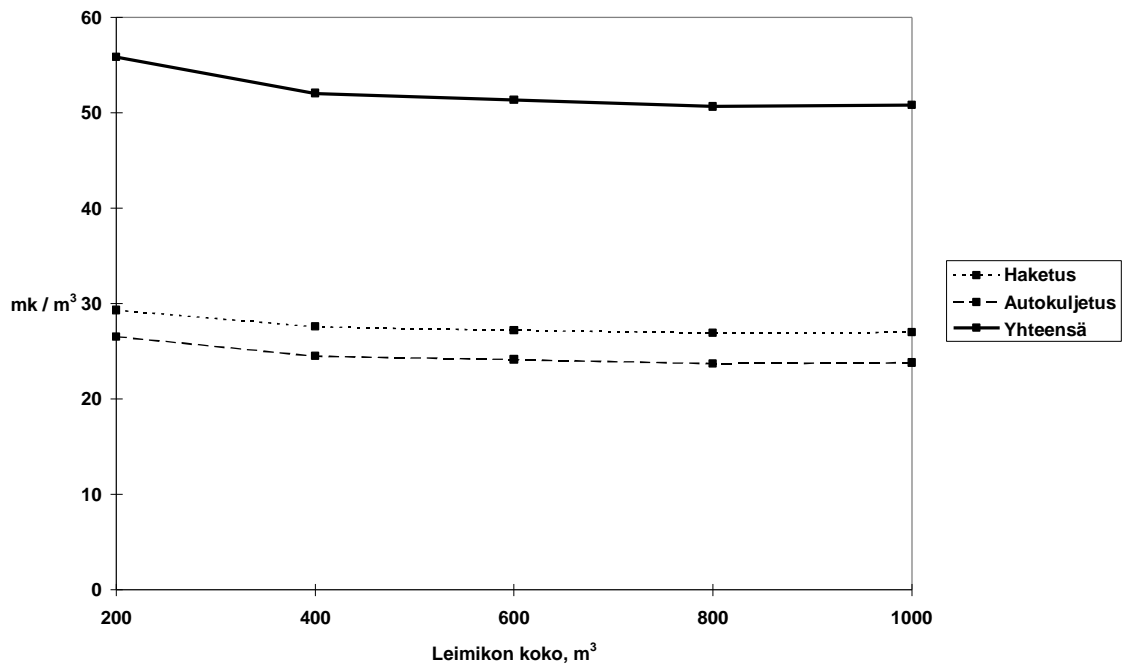
Hakkurin siirtoaikana työmaalta toiselle käytettiin neljää tuntia ja siirrosta aiheutuvina lisäkustannuksina 250:tä markkaa. Koneiden pitoaika asetettiin riippuvaiseksi simulointijaksolla toteutuneesta käyttötuntimäärästä. Työajan laskennassa periaatteena oli, että hakkuri toimii keskeytymättömässä kolmi-vuorotyössä.

Autojen ajonopeuksina ja kustannustietoina käytettiin Metsätehossa laaditun puutavara-autojen kustannuslaskentamallin tietoja. Kuorma-autojen ja perävaunun hinnat päivitettiin vastaamaan laskenta-ajan ja kaluston tasoa. Purkuun ja jonotukseen käytetyt ajanmenekki-funktiot laskettiin Metsätehon tätä tutkimusta varten keräämästä hakeautojen tehdasmittausaineistosta.

Tienvarsihaketuksessa työmaan kooksi asetettiin 400 m<sup>3</sup>, mikä vastaa suurimpien ensiharvennuskohteiden olosuhteita. Kustannukset ovat edullisimmat, kun käytössä on kaksi hakeautoa. Kolmas hakeauto laskee kustannuksia vasta, kun kaukokuljetus-äisyys oli yli 80 kilometriä (kuva 5).

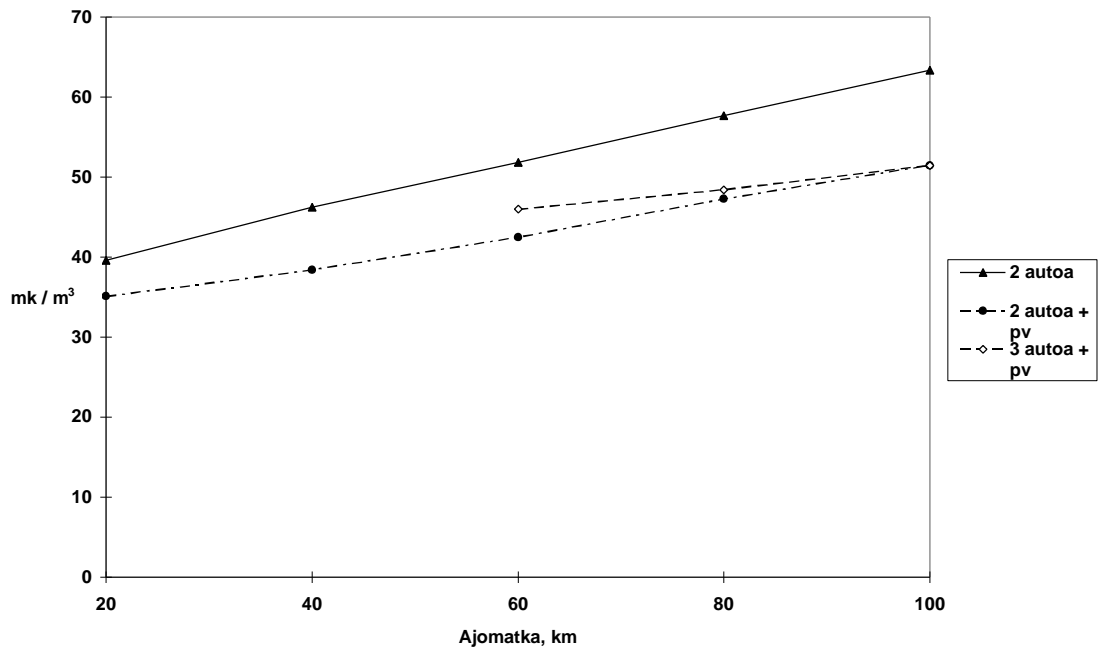


**Kuva 5.** Tienvarsihaketuksen ja kaukokuljetuksen kustannukset, mk/selluhake-m<sup>3</sup>.



**Kuva 6.** Työmaan koon vaikutus ketjukarsinta-kuorinta-haketuksen kustannuksiin.

Työmaan koon vaikutusta selvitettiin laskennalla, jossa kuljetusmatka oli 50 km ja käytössä oli kaksi hakeautoa. Työmaan koon laskiessa alle 400 m<sup>3</sup>:n haketusketjun kustannukset alkavat nousta (kuva 6). Haketusketjun kustannukset selluhakekuutiometriä kohti olivat 50 - 60 mk.



**Kuva 7.** Terminaalihaketuksen ja hakkeen kuljetuksen yhteensasketut kustannukset (lpv. = lisäperävaunu käytössä).

Pienillä työmailla havaittu kustannusten nousu johtuu työmaiden välisten siirtojen lisääntymisestä. Työmaata aloitettaessa aiheutuu lisäkustannuksia myös haketuspaikan valmisteluista, joiden osuus ajanmenekistä kasvaa työmaiden pienentyessä. Näitä kustannuksia ei sisällytetty simulointimalliin.

Terminaalivarastolla keskeytyksiä ja siirtymisiä on vähemmän ja hakkurin syötössä taakkojen keskikoko on isompi kuin tienvarsivarastolla. Sen vuoksi haketusketjun kustannukset ovat alemmat, kun jätetään osapuun kuljetus terminaalille huomioimatta. Sekä haketuksen että kaukokuljetuksen kustannuksia pystytään alentamaan, mikäli käytetään ylimääräistä perävaunua, joka vähentää hakkurin ja autojen odotusaikoja (kuva 7).

### 6.1.3 Tarkastelu

Tutkimuksessa selvitettiin ketjukarsinta-kuorinta-haketusyksikköön perustuvan haketusketjun kustannukset eri olosuhteissa. Työssä tehtiin ketjun toimintaa kuvaava simulointimalli. Haketukselle ja autokuljetukselle laskettiin työvaiheittaiset ajanmenekki- ja kustannusfunktiot. Laaditulla mallilla laskettiin haketusolosuhteiden ja -menetelmien vaikutuksia hakkurin ja kaukokuljetuksen tuottavuuteen ja kustannuksiin.

Simulointijakson pituudeksi riitti yksi viikko. Tässä ajassa mallin stokastisuuden vaikutukset olivat jo tasoittuneet. Mallissa oletettiin, että haketusketju

toimii keskeytymättömässä kolmivuorotyössä. Käytännössä tätä on varsin hankala järjestää, ja sen vuoksi todellisuudessa kustannukset ovat kaluston tehottomammasta käytöstä johtuen esitettyä korkeammat. Ylimääräisen perävaunun käyttö tehostaa haketusketjun käyttöä tuntuvasti. Normaaleilla kaukokuljetusmatkoilla haketusketjussa on edullisinta käyttää kahta hakeautoa.

Kerätystä aineistosta oli hankala laatia hakkurin työvaiheittaisia ajanmenekifunktioita, koska aineistoa ei alunperin kerätty simulointimallia varten. Mikäli korjuuketjua on tarkoitus analysoida simuloimalla, tulisi se ottaa huomioon jo aineiston keruuvaiheessa. Huomiota tulisi kiinnittää etenkin siihen, että yhden työtehtävän (esim. hakeauton täyttö) kaikkien työvaiheiden ajanmenekit pystyttäisiin kohdistamaan oikein.

## **6.2 Osapuunakorjuuseen perustuvat menetelmät sellutehtaan puunhankinnassa ja käsittelyssä**

### **6.2.1 Tavoite**

Tämän projektin yhtenä tehtävänä bioenergia tutkimusohjelmassa on ollut vaihtoehtoisten tutkimus- ja kehittämistyön kohteena olevien ensiharvennuspuiden tuotantoketjujen vertailu sellutehtaan näkökulmasta (Imponen ym. 1997). Tähän saakka näitä menetelmiä on verrattu toisiinsa selluhakkeen hinnan perusteella vaihdellen vaihtoehtoisen polttoaineen hintaa. Tällä tavalla menetellen analyysi on jäänyt puutteelliseksi. Vasta sellun valmistuskustannusten ja massatehtaan ulkopuolelle toimitettavan sähkön ja höyryn arvon huomioon ottaminen mahdollistaa erilaisten vaihtoehtoisten tekniikoiden kilpailukyvyyn vertailun. Toistaiseksi tässäkin on jouduttu rajautumaan muuttuvien kustannusten laskentaan. Pitkäaikaisesti vaikuttavien ratkaisujen pohjustaminen vaatisi lisäksi pääomakustannusten tarkastelua.

### **6.2.2 Vaihtoehtoisten menetelmien puunhankinta- ja sellunvalmistuskustannukset**

Puunhankintakustannukset tarkistettiin vuoden 1996 mukaisiksi. Oleellisesti parempia tehtaiden kuorimoita koskevia kapasiteetti-, tuottavuus- ja kustannustietoja ei ollut vielä käytettävissä. Koneellisen osapuunakorjuun ajanmenekkiä ei ole tutkimusohjelmassa päästy vielä perusteellisemmin tutkimaan. Tästä menetelmästä on kuitenkin käytännön kokemuksia, ja laskelmissa käytetty ajanmenekki ja kustannukset olivat yritysten konemaksujen tasolla (taulukko 9).

TAULUKKO 9

Ensiharvennusmänty. Minimirunko  $d_{1,3}$  9 cm:n luokka, minimilatvaläpimitta 7 cm, hakkuukertymä  $41 \text{ m}^3/\text{ha}$ , rungon keskikoko  $60 \text{ dm}^3$ , metsäkuljetusmatka 250 m, autokuljetusmatka 80 km

Erittely	Tavaralajeina hankinta		Osapuuna-hankinta		Massa-hake	
	Yksipuun	Joukkokäsittely	Rumpukuorinta	Ketjukarsinta	Osa-puu	Palstahake
Suhteellinen kertymä	100	101,5	110	110	110	1,10
Sellujakeen osuus	0,87	0,85	0,71	0,74	0,70	0,70
Kantohinta	75,0	73,89	68,18	68,18	68,18	68,18
Yleiskustannukset	25,0	24,63	22,73	22,73	22,73	22,73
Hakkuu	78,0	62,40				44,50
Metsäkuljetus/ korjuu	23,0	23,0	72,00	72,00	72,00	34,00
Tienvarsi yhteensä	201,0	183,92	162,91	162,91	162,91	169,41
Kaukokuljetus, 80 km	28,27	28,27	35,92	35,92	35,92	33,96
Prosessoinnit tehtaalla	10,01	11,02	16,45	21,10	23,77	17,88
Yhteensä	239,28	223,21	215,28	219,93	222,60	221,25

Vertailulaskelmat tehtiin lähtien nykyisin sovellettavista havukuitupuun mitoista. Minimiläpimittana oli 7 cm ja minimirungoksi määriteltiin 9 cm:n rinnankorkeusläpimittaluokka. Ensiharvennusmännyn ominaisuuksien kuvaamisessa käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen tutkimuksiin perustuvia arvoja (Hakkila ym. 1995) ja Metsätehon laskentamalleja.

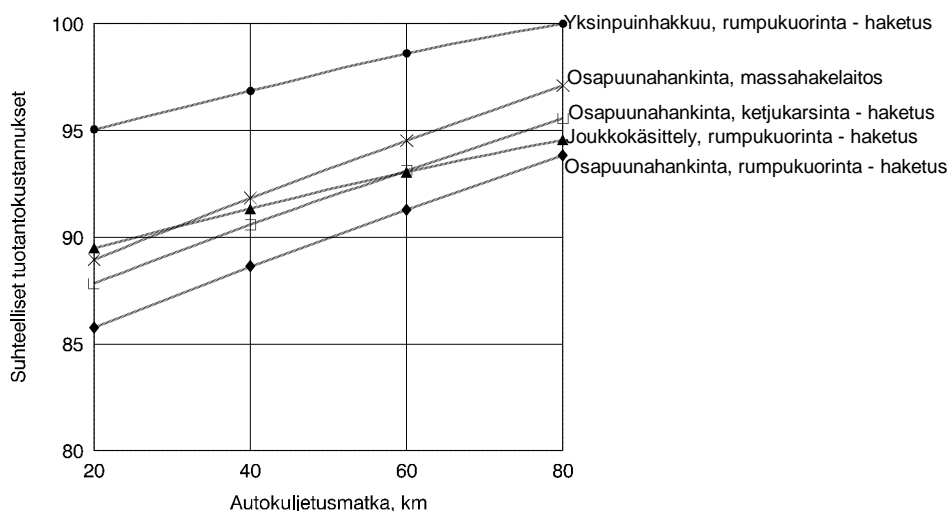
Sellunvalmistuksen kustannuslaskelmien perustana olivat Enocell Oy:n tehtaalle tehdyt puunkäsittelykokeet ja Keskuslaboratorion näyte-eristä mittaamat havainnot. Laskelmat vastaavat keskimääräisen sellutehtaan tuotantoa; ne eivät ole tehdaskohtaisia. Vertailutilanne määriteltiin seuraavasti.

- Tällä hetkellä energiaa tuotetaan vaihtoehtoisella polttoaineella.
- Kuitupuun mukana tuleva latvusmassa korvaa tätä polttoainetta.
- Tuotettu höyry käytetään tuotantolaitoksilla.
- Kuorikattila on tavanomaista nykyistä tekniikka.

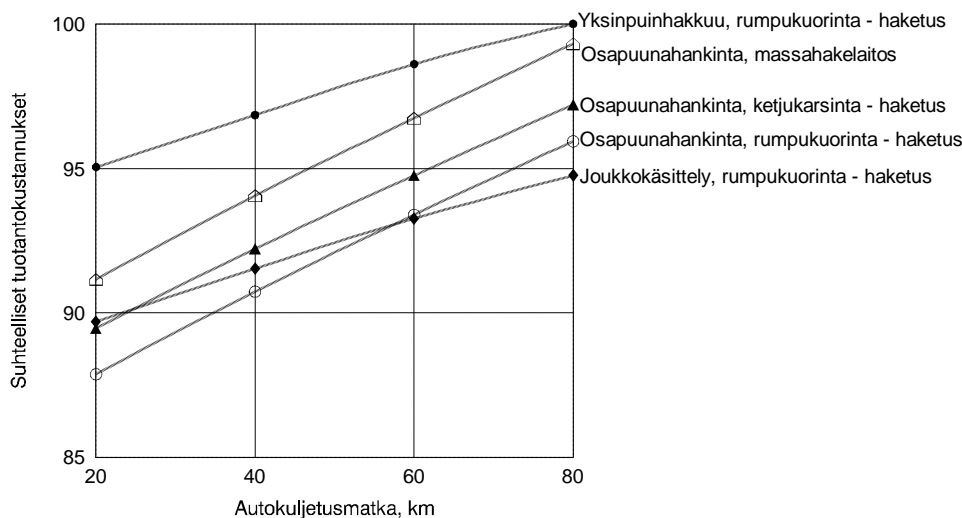


Kun vaihtoehtoisen polttoaineen kustannuksiksi oletettiin 45 mk/MWh, yhdistetyt kuitupuun ja puupolttoaineen tuotantomenetelmät olivat ensiharvennushakkuissa kustannuksiltaan kilpailukykyisiä joukkokäsittelyvään hakkuukoneeseen perustuvan hankintaketjun kanssa (kuva 8). Esitetty laskentatilanne määriteltiin puupolttoaineen käytön kannalta edulliseksi, koska lisähöyrylle oletettiin olevan kysyntää. Tilanne muuttuu, jos sitä ei tarvita teollisuuden tuotantolaitoksilla tai kaukolämpönä.

Vaihtoehtoisen polttoaineen arvon aleneminen 30 mk:aan/MWh heikensi runsaasti polttojaetta tuottavien menetelmien soveltamismahdollisuuksia. Yli 60 km:n kuljetusmatkoilla joukkokäsittelyhakkuuseen perustuva ketju näyttäisi olevan edullisin (kuva 9). Silti kaikki integroidut tuotantoketjut olivat edullisempia ensiharvennusmänniköiden korjuussa kuin koneellinen yksinpuinhakkuu.



**Kuva 8.** Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun suhteelliset tuotantokustannukset (hankinta ja sellunvalmistus). Vaihtoehtoisen polttoaineen hinta 45 mk/MWh. Korjuu- ja puunkäsittelykustannukset taulukon 9 (s. 30) mukaiset.



**Kuva 9.** Ensiharvennusmännystä valmistetun sellun suhteelliset tuotantokustannukset (hankinta ja sellunvalmistus). Vaihtoehtoisen polttoaineen hinta 30 mk/MWh. Korjuu- ja puunkäsittelykustannukset taulukon 9 mukaiset.



### 6.2.3 Tarkastelu

Koneelliseen korjuuseen ja tehtaalla tehtävään rumpukuorintaan perustuva osapuumenetelmä on kustannuksiltaan edullinen ja yksinkertainen ratkaisu karsimattoman puun hankintaan. Sen käyttö kuitenkin edellyttää kuorintaa karsitun puun joukossa, ja osapuun seososuus on pidettävä alhaisena, 10 - 15 %:na. Jos oksaista puuta halutaan hankkia enemmän, tarvitaan osapuurumpukuorintamenetelmän rinnalle myös muita vaihtoehtoja.

Pohjois-Amerikassa kehitetty ketju-karsinta-kuorintatekniikka tarjoaa uuden vaihtoehdon pieniläpimittaisen karsimattoman puun käsittelyyn. Toisin kuin perinteinen, seosperiaatteella rumpukuorintaa hyödyntävä osapuumenetelmä, ketjukarsintamenetelmät tukevat pyrkimystä raaka-aineen lajitteluun. Tosin karsimattomat rangat ja muutkin päävirrasta erotettavat kuituraaka-aineet on mahdollista katkaista ennen rumpukuorintaa, ja rummun jälkeen nämä muita lyhyemmät pölkyt voidaan prosessoida omalla linjallaan.

Eräs kiintoisa mahdollisuus kuitujen laadun parantamisessa voisi olla oksapuun erottelu muun kuitupuun joukosta. Tähän eivät nykyiset mekaaniset karsinta-kuorintalaitteet kykene. Sen sijaan värierotteluun perustuvaa massahakemenetelmää on kokeiltu tässä tehtävässä.

Kustannusvertailuissa oletettiin, että kuoripitoisuus erilaisia käsittelytekniikoita käytettäessä on tavoitteiden mukainen. Mahdollisia eroja hakkeen palakokojakaumassa otettu huomioon.

Usein unohtuu, että teknologiat ovat sidoksissa vallitseviin toimintamalleihin. Suuret rumpukuorimo-haketuslaitokset hyödyntävät kyllä mittakaavaetua, mutta toiminnan laatua ja tehokkuutta voitaisiin mahdollisesti parantaa yrittäjyyden avulla. Puunkäsittely-yritystoiminta voi käynnistyä ja laajentua uusien pienempien ja joustavampien teknisten ratkaisujen pohjalta.

## **7 ENERGIAPUUN HANKINTA TEOLLISUUDEN AINESPUUN HANKINNAN YHTEYDESSÄ KITTELÄN-SODANKYLÄN ALUEELLA**

### **7.1. Tavoite**

Metsäteollisuus kykenee käyttämään kaiken Pohjois-Suomessa tuotettavan jalostuskelpoisen puun. Ongelmana ei ole metsävarojen hyödyntämisen vähäisyys, vaan puun korjuuolosuhteista ja pitkistä kuljetusetäisyyksistä johtuvat korkeat kustannukset. Pohjoisessa tuotetun puun kilpailukyvyn parantamisessa eräänä keinona voi olla teollisuuspuun hankinnan yhteydessä toteutettava energiapuun hankinta ja siihen pohjautuva paikallinen energian tuotanto. Puupolttoaineen hankinnalla ja käytöllä on myös positiivinen vaikutus alueen talouteen (Lilleberg ym. 1994).

Metsäteho teki selvityksen, jonka avulla voitiin tehdä päätelmiä Kittilän - Sodankylän alueen metsävarojen käyttömahdollisuuksista energian tuotannossa. Lähtökohtana selvityksessä oli energiapuun hankinnan toteuttaminen teollisuuden ainespuun hankinnan yhteydessä. Ongelma sopi hyvin case-tarkasteluksi tutkimusohjelman ”Hake-, osapuu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa” -tutkimusprojektiin, ja laskelmat tehtiin pääosin tämän hankkeen puitteissa. Taloudellisuusanalyysit tehtiin myös päätehakkuiden hakkuutähteen hankinnalle. Aineistojen hankinta tehtiin maa- ja metsätalousministeriön myöntämällä erillisellä rahoituksella.

### **7.2 Integroidun kuitu- ja energiapuun hankinnan taloudellisuus**

Yksityisten ja valtion metsien hakkuutavoittaiset hakkuusuunnitteet selvitettiin alueella toimivien Metsähallituksen ja yksityismetsien organisaatioiden tuella. Tähän tietoon kytkettiin Metsätehossa olevat pystymittauksen runkolukusarjat. Näin hakkuumahdollisuudet pystyttiin kuvaamaan periaatteessa puukohtaisesti kuntien eri osa-alueilla. Toisena merkittävänä tehtävänä selvitettiin tarkastelualueen puutavaran kuljetusreitit ja juna- sekä autokuljetuksen kustannukset Kemiin, Rovaniemen rautatieterminalille ja Kemijärven sellutehtaalle.

Puunhankinnan ja -käsittelyn kustannuksia tarkasteltiin lähtien siitä, että ensiharvennuskohdeista manuaalisesti hakattu osapuu ja päätehakkuiden hakkuutähte kuljetetaan laidallisilla autoilla kuntien lämpölaitosten yhteydessä oleville terminaaleille jatkokäsiteltäväksi. Karsimattoman kuitupuun käsittelyssä oletettiin käytettävän siirrettävää ketjukarsinta-rumpukuorintayksikköä ja puupolttoaineiden hienontamisessa erillistä auton päälle rakennettua murskainta. Selvityksessä tutkittiin seuraavia, vaihtoehtoisia toimintamalleja.

- 1 Koneelliseen tavaralajikorjuuseen perustuva hankinta vertailumenetelmänä.
- 2 Osapuunahankinta, ketjukarsinta-rumpukuorinta ja murskaus lämpölaitoksella, kuorettoman kuitupuun kuljetus tehtaille (integroitu tuotantomenetelmä).
- 3 Pienikokoisen ensiharvennuspuun hankinta osapuunmenetelmällä ja murskaus pelkästään polttokäyttöön.
- 4 Hakkuutähteen hankinta päätehakkuista ja murskaus käyttöpaikalla.

Laskelmien mukaan puupolttoaineen hankinta ainespuun korjuun yhteydessä paikallisille lämpölaitoksille ensiharvennuskohteilta heikentäisi toiminnan taloudellisuutta. Puunkäsittely energialaitosten terminaalissa ja kuljetusvaiheet aiheuttivat lisäkustannuksia kuitupuulle, ja energijakeen arvolla 45 mk/MWh integroitu hankinta ei ollut kannattavaa. Tavanomaiseen tavaralajihankintaan verrattuna sellujakeen kustannukset nousivat havupuulla 22 - 35 % ja koivulla 20 - 34 % (taulukko 10). Puupolttoaineen hinnan olisi pitänyt olla yli 85 mk/MWh, jotta integroitu hankinta olisi ollut taloudellista.

Puupolttoaineen hankinta ensiharvennuksista suoraan lämpölaitokselle itsenäisenä toimintona on toinen vaihtoehto, jolla voisi olla merkitystä Kittilän-Sodankylän alueen metsävarojen hyödyntämisessä. Pienikokoisen ensiharvennuspuun hankinta kuntien lämpölaitoksille ei kuitenkaan ollut laskelmien mukaan riittävän taloudellista. Tämä vaihtoehto näytti kuitenkin kilpailukykyiseltä integroituun kuitu- ja energiapuun korjuuseen verrattuna (taulukko 11).

**TAULUKKO 10** Ensiharvennuksista integroidulla menetelmällä tuotettavan kuitupuun ja puupolttoaineen kustannukset. Osapuun vähimmäisläpimitta 6 cm. Kuitupuu toimitetaan kuljetusten kannalta edullisimmalle sellutehtaalle.

Erittely	Kittilä		Sodankylä	
	Havu- osapuu	Koivu- osapuu	Havu- osapuu	Koivu- osapuu
Hakkuusuunnite, m <sup>3</sup> /v	27 395	6 807	42 275	5 830
Kuntaan jäävä polttojake, m <sup>3</sup> /v	8 218	2 042	12 682	1 749
Kuorittu kuitupuu, m <sup>3</sup> /v	19 177	4 765	29 593	4 081
Poltojakeen kustannukset, mk/MWh	45	45	45	45
Sellujakeen suhteelliset kustannukset Kemin tai Kemijärven tehtaalla (karsittuna hankinta = 100)	122 - 124	120 - 122	129 - 135	126 - 134

TAULUKKO 11 Pienirunkoisista ensiharvennuskohteista osapuuna ja kuusivaltaisista päätehakuista hakkuutähteenä hankitun puupolttoaineen tuotantokustannukset.

Erittely	Kittilä		Sodankylä	
	Osapuu harvennuksista	Hakkuutähde	Osapuu harvennuksesta	Hakkuutähde
Hakkuusuunnite, m <sup>3</sup> /v	6 700	1 700	9 600	3 900
Kustannukset lämpölaitoksella, mk/MWh	88 - 96	61 - 71	89 - 98	64 - 76

Kuusivaltaisten päätehakkuiden hakkuutähteen hankinnassa työvaiheita on vähemmän, ja kustannukset ovat alhaisemmat kuin harvennuspuulla. Pohjois-Suomessa puustot ovat harvoja ja hakkuutähteen alhaisen kertymän vuoksi metsäkuljetus on kallista. Murskauksen keskittäminen lämpölaitoksille säästää käsittelykustannuksia, mutta toisaalta autokuljetuskustannukset kasvavat tästä johtuen. Kuusivaltaisten metsien hakkuutähteen hankintakustannukset tarkastelualueella olivat 60 - 75 mk/MWh (taulukko 11).

Nuorten metsien kunnostukseen voidaan saada valtion tukea. Jos tämä tuki suunnataan osaksi korjuuseen ja sillä korvataan metsänomistajan kantoraha, puupolttoaineen kustannukset alenisivat noin 30 mk/MWh. Tämän seurauksena pienikokoisen harvennuspuun kustannukset käyttöpaikalla olisivat samalla tasolla kuin hakkuutähteitä hankittaessa.

### 7.3 Tarkastelu

Hakkuutähde oli Kittilän-Sodankylän alueen energian tuotannossa taloudellisesti edullisin puupolttoaine. Senkään käyttö ei ollut liiketaloudellisesti kannattavaa. Hyvien hakkuutähteen korjuukohteiden määrä on pohjoisessa vähäinen. Pääosa päätehakuista oli mäntyvaltaisia ja kuusivaltaiset kohteet ovat niin vähäpuustoisia, ettei tähdettä ei kerry pinta-alaa kohti riittävästi.

## **8 ENSIHARVENNUSPUUN KORJUU OSANA HANKINTA-ALUEEN TOIMINTAA**

### **8.1 Tavoite**

Puunhankinnassa ei ole mahdollista ratkaista korjuu- ja kuljetusmenetelmiä yksittäisten puutavaralajien hankinnan ja käytön vaatimusten mukaan, vaan suurten metsäteollisuusyriyten metsäorganisaatioiden on otettava huomioon toiminnan kokonaistaloudellisuus. Myös korjuuolosuhteiden painottuminen erilaisiin hakkuisiin vaikuttaa menetelmävalintaan. Viimeisen vuosikymmenen ajan korjuumenetelmien kehittämisessä on korostetusti ollut tavoitteena yleismenetelmien ja -tekniikoiden hyödyntäminen. Vallitsevan käsityksen mukaan useamman erilaisen hankinta- ja puunkäsittelyketjun rinnakkainen käyttö nostaa kustannuksia.

Tässä projektissa rakennettiin Imponen (1992) esittämän korjuumenetelmien optimointimallin tyyppinen, kuitupuun ja puupolttoaineiden yhdistetyn tuotannon kilpailukyvyyn tutkimiseen soveltuva, matemaattiseen ohjelmointiin perustuva laskentamalli (Imponen 1997). Tällä tutkimusvälineellä voidaan tarkastella tietyn sellutehtaan puunhankinnan toimintaolosuhteet huomioon ottaen osa- ja kokopuunmenetelmien taloudellisuutta tavanomaisiin tavaralajimenetelmiin verrattuna. Toimintaolosuhteet kuvataan korjuukohdetyypeittäin ja kuljetusetäisyydet otetaan huomioon vyöhykkeittäin tai alueittain. Korjuukoneita ja kuljetuskalustoa tarkastellaan kone- ja laitekomponenteittain. Esimerkiksi puutavarayhdistelmän vetoautolla, perävaunulla ja kuormaimella on omat pääomakustannuksensa. Puunkäsittelyä ja massanvalmistusta ei voitu vielä perustietojen puutteellisuuden vuoksi mallintaa näin tarkasti. Oleellinen ero aiemmin käytettyihin operaatiotutkimuksen mallinnustapoihin on se, että myös koneiden käyttöasteet ja pääomakustannukset ovat optimoinnissa muuttujia, eivätkä muuttumattomina annettavia syöttötietoja, kuten tavallisesti. Tämä mahdollistaa yleis- ja erikoismenetelmien kilpailutilanteen realistisen tarkastelun.

### **8.2 Osapuunahankinnan kokonaiskustannusvaikutukset**

Kuitupuun ja puupolttoaineen yhdistettyjen tuotantomenetelmien kilpailukykyä tavaralajimenetelmän kanssa tutkittiin mallintamalla hankinta-alueen vuotuinen korjuu- ja kuljetustoiminta. Korjuuolosuhteet ja kuljetusetäisyydet vastasivat eteläisen Suomen länsirannikolla toimivan sellutehtaan toimintaolosuhteita. Tässä vaiheessa optimointiin otettiin mukaan vain puunhankinnan kustannukset.

Esitettävän case-tarkastelun lähtökohtana oli metsäteollisuutta palvelevan puunhankinta-alueen vuotuinen toiminta, joka kuvattiin vuosikolmanneksittain tehtävinä korjuu- ja kuljetusoperaatioina. Kaikkien hakkuista kertyvien puutavaralajien korjuu ja kuljetus olivat tarkastelussa mukana, jotta yleis- ja erikoistekniikoiden rinnakkaisen käytön kustannusvaikutukset saatiin selvi-

tettyä. Yhdistetty kuitupuun ja puupolttoaineen hankinta sijoitettiin osaksi hankinta-alueen toimintaa, ja optimointimallilla minimoitiin oman korjuun ja sitä vastaavan kuljetuksen kokonaiskustannukset sekä mitoitettiin töissä tarvittavat resurssit koneyksikön tarkkuudella.

Tavaralajimenetelmän hankintaketjujen rinnalla ensiharvennuksissa oli vaihtoehtona koneellinen osapuunahankinta. Muut kuin kuusivaltaiset metsät kuuluivat osapuun hankintapotentiaaliin. Karsimaton puu korjattiin kourasahalla varustetulla yhdistelmäkoneella, joka kaataa, katkoo ja kuljettaa puut metsätien varteen. Autokuljetuksessa oletettiin käytettävän karsimattoman puun kuljetukseen soveltuvaa laidallista puutavarayhdistelmää, joka voi kuljettaa myös karsittua puutavaraa silloin, kun oksaista puuta ei ole ajettavana. Laskelmissa kuitupuun minimiläpimittana oli 7 cm. Näiden lähtökohtien mukaan tehdyt laskelmat osoittivat, että koneellinen osapuun menetelmä sovitettuna hyvin yhteen joukkokäsittelyhakkuukoneiden toimintaan on taloudellinen ratkaisu ensiharvennuspuun hankinnassa (taulukko 12).

**TAULUKKO 12** Hankinta-alueen korjuu- ja kuljetuskustannukset sekä kalusto karsimattoman ensiharvennuspuun korjuumäärien vaihdellessa. Ensiharvennusten, muiden harvennusten ja päätehakkuiden osuudet 12, 22 ja 66 %. Osapuunakorjuun osuutta ohjattiin asettamalla kourasahatraktoreita käyttöön 5, 10 ja 15 kpl (osapuu 1, 2 ja 3 vaihtoehdot).

Resurssit ja kustannukset	Tavaralaji-korjuu	Osapuu 1	Osapuu 2	Osapuu 3
<b>Pystykauppojen korjuu</b>				
Korjuumäärä, 1000 ainespuu-m <sup>3</sup> /v	2 000	2 000	2 000	2 000
Korjuusta osapuuta, 1000 m <sup>3</sup> /v	-	56,6	107,7	158,8
Lisäraaka-ainekerroin	-	1,1	1,1	1,1
Kuljetussäde, km	-	45	70	85
<b>Korjuuresurssit</b>				
Hakkuukoneketjut, kpl	45,0	42,2	39,9	37,5
Ketjun käyttötuntikustannukset, mk/h	715,8	705,4	693,6	680,8
Kourasahatraktorit, kpl	-	5,0	10,0	15,0
Traktorin käyttötuntikustannukset, mk/h	-	292,7	299,4	301,7
<b>Kuljetusresurssit</b>				
Puutavara-autot, kpl	63,5	61,9	60,0	58
Puutavara-auton käyttötuntikustannukset, mk/h	316,6	316,6	316,7	316,8
Osapuu-autot, kpl	-	2,4	5	8
Osapuu-auton käyttötuntikustannukset, mk/h	-	327,7	327,8	327,7
<b>Kokonaiskustannukset</b>				
Korjuu- ja kuljetuskustannukset, mk/aines-m <sup>3</sup> (sis. hyvityksen lisäpolttoaineesta, 30 mk/MWh)	68,7	68,5	68,5	68,6

Hankinnan optimointilaskelmat tehtiin omaa korjuuta vastaavalle puumäärälle. Tavaralajeina hakkuussa oletettiin käytettävän joukkokäsitteliä hakkuukoneita, jotka toimivat ketjussa keskikokoisen kuormatraktorin kanssa. Polttoainehyvitystä laskettaessa oletettiin, että osapuun käsittelyä voidaan kehittää siten, että puuhäviö, hakepalakokojakauma ja hakkeen kuoripitoisuus saadaan vastaaviksi kuin joukkokäsittelyllä hakkuu-rumpukuorintatekniikalla. Hakkuukoneketjujen tuntikustannukset laskivat samanaikaisesti, kun osapuun korjuuta ja kuljetusta ensiharvennuksissa lisätään. Samalla osapuunakorjuussa tuntikustannukset kasvoivat. Kaatavalla kourasahalla varustettujen kuormatraktoreiden käyttö pienirunkoisissa ja -kokoisissa kohteissa alentaa muissa olosuhteissa käytettävän koneellisen tavaralajimenetelmän kustannuksia tosin vain 5 % taulukon 12 esimerkitapauksessa, mutta tämä säästö koskettaa kaikkia hakkuuta ja puutavaralajeja, joiden valmistuksessa yleismenetelmää käytetään. Osapuuna korjattavan puumäärän kasvaessa kourasahatraktoreiden tuntikustannukset taas kasvavat 9 %, kun karsimattoman puun korjuuta lisätään noin 20 000 kuutiometristä 160 000 kuutiometriin vuodessa. Autokuljetuksessa ei vastaavia ilmiöitä esiinny. Tähän vaikuttanevat osaltaan malliin asetetut varastointirajoitukset.

### 8.3 Tarkastelu

Korjuu koneellisella osapuumenetelmällä on kilpailukykyinen vaihtoehto ensiharvennuspuun korjuussa. Koska yhden koneen pääoma- ja siirtokustannukset ovat pienemmät kuin tavallisessa hakkuu- ja ajokoneeseen perustuvassa korjuussa, koneellista osapuumenetelmää voidaan käyttää osittain kausiluonteisesti. Kylmänä vuodenaikana kourasahatraktoreilla korjataan konekapasiteettia tehokkaasti hyödyntäen kuitupuun ohella myös latvusmassaa energian lähteeksi. Lämpimänä vuodenaikana tavaralajimenetelmän yleiskoneketjuilla on vähemmän töitä. Tämän vuoksi kesäaikana kantavien, kuivien maiden ensiharvennukset on taloudellista korjata joukkokäsittelyllä hakkuukoneilla ja niiden kanssa ketjussa toimivilla kuormatraktoreilla. Kesäaikaiseen korjuuseen soveltuvat ensiharvennuspuustot kasvavat karummilla mailla, joilla latvusmassan korjaaminen saattaisi vaikuttaa haitallisesti kasvuun. Nämä kohteet soveltuvat hyvin vajaan karsiville joukkokäsittelyhakkuukoneille. Talvella useamman puun tehokasta käsittelyä tarvitaan päätehakkuuleimikoiden kylkiäisenä tulevilla ensiharvennuslohkoilla. Optimointilaskelmat osoittivat, että koneellinen osapuumenetelmä ja joukkokäsittelyhakkuu täydentävät hyvin toisiaan, kun otetaan huomioon korjuumäärien ja kohteiden kausittainen vaihtelu. Molemmat menetelmät tarvitaan kokonaisaloudellisuuteen tähtäävässä korjuutoiminnassa.

Kun 7 % ainespuusta hankintaan osapuumenetelmällä, samalla hakkuukoneketjujen tuntikustannukset alenevat 5 %. Hakkuu- ja metsäkuljetuskoneiden kapasiteetti on paremmin tasapainoissa, ja siirtojen osuus ajanmenekistä pienenee, koska pienirunkoiset ja -kokoiset kohteet korjataan osapuumenetelmää soveltaen yhdistelmäkonereilla. Kun muuttuvien kustannusten lisäksi koneiden käyttöaste ja pääomakustannukset ovat muuttujina opti-

mointimallissa, on menetelmien välille löydettävissä tasapainoratkaisuja, joita ei voida ottaa huomioon tavanomaisissa kiinteisiin yksikkökustannuksiin perustuvissa taulukkolaskelmissa ja optimointitarkasteluissa. Samansuuntaisia tuloksia on saatu aiemminkin (Imponen 1992). Tutkimuksessa käytetty mallinnustapa on täysin talousteorian mukainen (Luenberger 1995). Metsäteknologisessa tutkimuksessa eikä ilmeisesti muussakaan teknis-taloudellisessa tutkimuksessa ole yleensä tehty vastaavan tyyppisiä analyysejä mikroekonomin viitekehystä lähtien.

Sellun ja energian tuotantoa ei liitetty suoraan puunhankintamenetelmien optimointimalliin, koska hankinnan alueella esiintyviä tilanteita haluttiin tutkia ensin sellaisenaan ja toisaalta riittäviä perustietoja ei ollut vielä käytettävissä. Teknisesti tämä kytkentä on sinänsä ongelmaton, mutta tarvittavat tiedot ovat osittain tehdas- ja yrityskohtaisia. Lisäksi varsinkin puunkäsittelyä koskevat tuotos-, ja kustannustiedot ovat puutteellisia. Resurssien puutteen vuoksi tapaustutkimuksia ei voitu tehdä niin laajoina kuin alunperin suunniteltiin. Toisaalta tietopohjassa olevien puutteiden vuoksi niihin ei vielä tässä vaiheessa ollut järkevää sijoittaa enempää tutkimusvaroja.

## **9 JATKOTOIMENPITEET**

Puunhankinnan, energian tuotannon sekä sellun valmistuksen kattava erilaisten yhdistettyjen kuitupuun ja puupolttoaineen tuotantoketjujen taloudellisuuden vertailu on vaativa tehtävä, koska se edellyttää useiden asiantuntemus- ja tutkimusalojen tuottamien tietojen yhtäaikaista hallintaa ja mallintamista. Tämä työ on kuitenkin tehtävä, ennenkuin käytännössä voidaan aloittaa uusien tekniikoiden merkittävä soveltaminen. Tässä projektissa eri osaluokat saatiin tutkijoiden ja yritysten yhteistyön ja kokeellisen tutkimuksen pohjalta liitettyä niin pitkälle yhtenäiseksi kokonaisuudeksi, että ensimmäisiä herkkyyksianalyysejä voitiin tehdä. Jatkotutkimuksissa voidaan edetä jo pitemmälle esimerkiksi ottamalla paremmin huomioon sellutehtaan vaihtoehtoiset energiantuotannon tekniikat. Myös sellun valmistuskustannukset olisi selvitettävä kokonaisemmin sekä havusellun että koivusellun tuotannon näkökulmasta.

Useita tuotantovaiheita koskevat perusteet olivat vielä epävarmoja. Koneellisesta osapuunakorjuusta ei esimerkiksi ollut saatavilla riittäviä aikaturkimustuloksia. Karsimatonta tai karsittua puutavaraa valmistavia ja kuljettavia yhdistelmäkoneita koskevat aikaturkimukset tehdään vuoden 1997 aikana, ja näiden tekniikoiden kokonaistaloudellisuutta tutkitaan tässä valmistuneessa hankkeessa testatuilla menetelmillä. Puunkäsittelyn tekniikat ja erilaisen käsittelyn vaikutukset puuraaka-aineeseen ovat edelleen puutteellisesti tunnettuja. Toisaalta tältä alueelta saattaa löytyä uusia merkittäviä mahdollisuuksia pyrittäessä raaka-aineen lajitteluun ja massalaatujen parempaan tuotekohtaiseen erilaistamiseen.



## 10 JULKAISUT JA VIITEKIRJALLISUUS

Raportit:

- Imponen V.** 1997. Hake-, puu- ja puutavaralajimenetelmien taloudellisuus massatehtaan kuitu- ja energiapuun hankinnassa. Artikkelijulkaisussa Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 14. Vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka, s. 297 - 310. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. Jyväskylä
- Imponen V., Hakkila P., Lilleberg R., Pennanen O., & Varhimo A.** 1997. Ensiharvennusmänty sellutehtaan raaka-aineena. Metsätehon raportti 24, 30.5.1997. Helsinki
- Korpilahti A., Varhimo A., Keskinen S. & Lemmetty J.** 1995. Minimiläpimitan vaikutus puunhankintaan ja sellunvalmistukseen. Metsätehon katsaus 11/1995. Helsinki
- Lilleberg R., Imponen V., & Yli-Hukkala T.** 1994. Energiapuun hankinta teollisuuden ainespuun hankinnan yhteydessä Kittilä-Sodankylän alueella. Metsätehon moniste 31.3.1994.
- Nousiainen I., Imponen V., Jaatinen E. & Korpilahti A.** 1995. Puupolttoaineiden tuotantomenetelmät. Nykytekniikka, kustannukset ja kehittämismahdollisuudet. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 5. VTT Energia.
- Poikela A.** 1996. Latvusmassan pituussuuntainen jakauma. Metsätehon raportti 10, 11.12.1997. Helsinki
- Viinikainen S., Malinen H. Korpilahti A., & Imponen V.,** 1994. New harvesting methods and their effect to the energy balance and equipment in Finnish pulp and paper industry. European congress on economics and management of energy in industry. Estoril, Lisbon, 5 - 9 April, 1994.
- Vuorenpää T.** 1996. Peterson Pacific -haketusketjun optimointi. Esimerkki simuloinnin käytöstä. Metsätehon raportti 4, 27.8.1996. Helsinki

Viitekirjallisuutta:

**Hakkila, P.** 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. Metsäntutkimuslaitos.

**Hakkila P., Kalaja H., & Saranpää P.** 1995, Etelä-Suomen ensiharvenusmänniköt kuitu- ja energian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 582.

**Helynen S. & Nousiainen I.** 1996. Biopolttoaineiden tuotantopotentialit ja käyttö. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 26/1996.

**Imponen V., Hämäläinen J., & Örn J.** 1992. Hakkuun koneellistamisen taloudelliset ja organisatoriset vaikutukset. Metsätehon tiedotus 407. Helsinki

**Kosunen P. & Leino P.** 1995. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 99/1995.

**Luenberger D. G.** 1995. Microeconomic theory. Mc Graw-Hill Inc.

Puupottoaineiden tuotanto. Tutkimus- ja kehitystyön suuntaaminen vuosille 1996 - 98. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 8/1995. VTT Energia.

Kunnittaisista yksityismetsien hakkuusuunnitteista johdetut lääneittäiset puupolttoaineen tuotantopotentiaalit. Tiedot on yleistetty pinta-alaosuuksien perusteella myös valtion, yhteisöjen ja yritysten metsille (Helynen ja Nousiainen 1996).

Läänit	Puupolttoaineen tuotantopotentiaalit	
	Hakkuutähde	Ensiharvennuspuu
	milj.m <sup>3</sup> /vuosi	
Uudenmaan	0,20	0,06
Turun ja Porin	0,20	0,29
Hämeen	0,43	0,34
Kymen	0,19	0,19
Mikkelin	0,35	0,32
Kuopion	0,59	0,24
Pohjois-Karjalan	0,35	0,32
Vaasan	0,26	0,35
Keski-Suomen	0,43	0,30
Oulun	0,43	0,74
Lapin	0,21	0,43
Koko maa	3,64	3,58