



Seppo Rouvinen



Annika Kangas



Matti Maltamo

Seppo Rouvinen, Annika Kangas ja Matti Maltamo

## Männikön laatujakauman kuvaaminen oksarajatiedon avulla kuvioittaisessa arvioinnissa

**Rouvinen, S., Kangas, A. & Maltamo, M.** 1997. Männikön laatujakauman kuvaaminen oksarajatiedon avulla kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia* 4/1997: 477–492.

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisten kuvioittaisessa metsänarvioinnissa käyttökelpoisten menetelmien hyvyttä männyn ulkoisen oksikkuuden huomioon ottamisessa. Oksikkuustunnuksista käsiteltiin rungon laatuun vaikuttavista tekijöistä alimman kuolleen oksan (kuivaoksaraja) ja elävän latvusrajan (latvusraja) korkeutta. Ko. oksarajatunnusten sekä puun rinnan korkeusläpimitan ja pituuden avulla rungot arvoapteerattiin dynaamisella optimoinnilla käyttäen laatuluokkina ulkoisesti oksatonta (I-laatu), terveoksaista (II-laatu) ja kuivaoksaista (III-laatu) laatua.

Tutkimus jakautui kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa koealojen läpimittajakauma muodostettiin Weibull-jakauman avulla, estimoitiin jakauman puille pituudet, kuivaoksa- ja latvusrajat ja optimoitiin rungot. Lopuksi laskettiin hehtaarikohtaiset tunnuksat. Aineistona oli 65 VAPU (Valtakunnallinen puututkimus) -koealaa. Toisessa osassa simuloitiin kahteen metsikköön (Jaamankangas, Kontiolahti ja Mekrijärvi, Ilomantsi) relaskooppikoealoja, joissa kokeiltiin erilaisten mittausyhdistelmien ja koealojen lukumäärän vaikutusta eri laatuluokkien hehtaarikohtaisiin tuloksiin.

Rungon tukkiosan jakaminen eri laatuluokkiin onnistui tarkastellussa tilanteessa harhattoimimmin menetelmällä, jossa koealan keskipuun oksarajatunnukset yleistetään suoraan kaikille koealan puille. Kokeillut mallit sekä kuivaoksa- että latvusrajalle osoittautuivat epätarakoiksi kalibrointienkin jälkeen. Koealojen lukumäärän vaikutus tulosten tarkkuuteen riippui käytetystä menetelmästä.

Asiasanat: mänty, oksikkuus, laatu, dynaaminen optimointi, metsäninventointi  
Yhteystiedot: *Rouvinen*, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu; *Kangas*, Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema, PL 44, 69101 Kannus; *Maltamo*, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Faksi (013) 251 3590, sähköposti [seppo.rouvinen@forest.joensuu.fi](mailto:seppo.rouvinen@forest.joensuu.fi)  
Hyväksytty 30.10.1997

# 1 Johdanto

Suomalaisen sahateollisuuden kilpailukyky kansainvälisillä markkinoilla perustuu paljolti raaka-aineen eli raakapuun korkeaan laatuun. Vaikka sahateollisuus kokonaisuudessaan toimii hyvin tehokkaasti ei se kuitenkaan pysty täysin hyödyntämään Suomen metsien korkeaa laatua ja puuston monipuolisuutta. Yksi merkittävä puute metsä-teollisuus-markkinat-ketjussa on tarkan tiedon puute metsiköistä (esim. Uusitalo 1995). Asiakaslähtöisen ja yhä paremmin integroituneen tuotantoketjun kehittämiseksi tarvitaan entistä yksityiskohtaisempaa ja tarkempaa tietoa metsikkökuvioiden puuston koko- ja laatujaikamista.

Puuston laadun kuvaamisen merkitys on kasvanut tukkien laatuvaatimusten tiukentumisen myötä. Lisäksi vaaditun laatumaksutavan käyttöönotto sahatukkien hinnoittelussa lisää puuston laadun tarkkuusvaatimuksia. Laatumaksutapaa on vaadittu (esim. Vuokila 1982) ja menetelmiä sen pohjaksi on kehitetty (esim. Heiskanen 1984, 1988, Laatumaksutapa-hyödyksi... 1985, Yksinkertaistettu määntytukin... 1985). Kuitenkin sen käyttö Suomessa on tähän saakka ollut vähäistä verrattuna esim. Ruotsiin (Jauhiainen 1996), ja puuston hinta määräytyykin edelleen myyjän ja ostajan neuvottelutuloksena, jolloin hintaan tavallisesti vaikuttavat esim. leimikon koko ja sijainti ratkaisevammin kuin puuston laatu. Laatuakin silmälläpitäen on leimikon ennakkomittaukseen kehitetty kevyttä otantaan perustuvaa pystymittausta (esim. Lemmetty ja Mäkelä 1992, Uusitalo ja Kivinen 1994).

Tärkeä linkki puunmyyjän ja -ostajan välillä on metsäsuunnitelma. Metsäsuunnitelmaa varten metsälö jaetaan metsikkökuvioihin, joille kullekin arvioidaan erikseen kuviotiedot. Kuvioittaisessa arvioinnissa puuston kuvaus perustuu nykyisin yleisimmin käytetyissä järjestelmissä metsiköstä mitattaviin keskitunnuksiin, kuten keskiläpimittaan ja -pituuteen, sekä pohjapinta-alaan. Näiden tunnus-ten avulla kuviolle ennustetaan teoreettinen läpimittajakauma (esim. Mykkänen 1986). Puukohtaisten pituus- ja tilavuusmallien avulla lasketaan jakaumasta poimituille kuvauspuille tilavuus (esim. Laasasenaho 1982, Veltheim 1987). Kuvauspuiden tilavuuksien runkoluvulla painotettuna summana

saadaan kuvion kokonaistilavuus.

Kuvioittaisessa arvioinnissa saatava arvio puuston laadusta on nykyisten vaatimusten mukaan luottavuudeltaan riittämätön. Metsikön puutavaralajirakenteesta saadaan kuvioittaisen arvioinnin laskennan yhteydessä puuston ulkoisten dimensioiden mukainen arvio ennustetun läpimittajakauman avulla. Ulkoisten dimensioiden perusteella saadaan puuston tukkiosuudelle kuitenkin maksimaalinen arvio, joka erilaisten laatua alentavien tekijöiden kuten oksikkuuden, lenkouden, kierteisyyden ja lahon vuoksi on yliarvio.

Käytössä olevissa suunnittelulaskelmissa arvioidaan silmävaraisesti puujaksottainen tukkivähennys, joka ilmaisee prosentuaalisesti paljonko kuviolta on odotettavissa tukkia verrattuna ulkoisten dimensioiden mukaiseen arvioon. Menetelmää tutkimuksessaan kokeillut Vähäsaari (1988) toteaa, että kuvioittaisessa arvioinnissa prosentuaalinen vähennys puutavaralajin tilavuuksiin on hankala käyttää. Yksityismetsätaloudessa paljon käytetyssä SOLMU (entinen TASO)-systeemissä annetaan suoraan arvio kunkin puulajin tukkipuuosuudesta kuviolta tai ohjelma laskee tukkiosuuden keskitunnusten perusteella muodostetun runkolukusarjan avulla (SOLMU... 1996). Näissä menetelmissä ei tukkiosuuden laatujaikamasta kuitenkaan saada minkäänlaista tietoa. Samoin esim. Nyyssösen ja Ojansuun (1982) sekä Päivisen (1983) esittämät metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmät antavat tiedon vain kokonaistukkitilavuudesta.

Kuvioittaisen arvioinnin maastotöiden yhteydessä ei voida mitata kovinkaan suurta määrää tunnuksia metsiköstä tai yksittäisistä puista. Nykyiseen verrattuna puuston laadun kohdalla kyseeseen tulevia lisämittauksia voisivat olla kuvion keskimääräisten latvusarjan ja kuivaoksarajan arvioinnit tai tietyn puun, esim. keskipuun, oksarajojen mittaukset. Oksatunnusten käyttö laadun kuvaamisessa on perusteltua, sillä oksikkuus määrittää käytännössä valtaosan tukin laadusta (Heiskanen 1954, Kärkkäinen 1980).

Monissa tutkimuksissa on käsitelty erilaisten metsikkötekijöiden (esim. puuston tiheys ja kasvupaikan viljavuus) ja metsänhoitotöiden (esim. uudistamismenetelmä, harvennus, pystykarsinta ja lannoitus) vaikutusta männyn laatuun (esim. Uusvaara 1974, Varmola 1982, Kellomäki ja Väisänen 1986, Mäkinen ja Uusvaara 1993). Tutkimukset osoitta-

vat mm., että rungon oksikkuus pienenee metsikön tiheyden kasvaessa tiettyyn rajaan saakka ja kasvupaikan ravinteisuus lisää oksikkuutta. Vaikka kasvupaikan ravinteisuuden ja rungon oksikkuuden välillä on selvä korrelaatio, metsätyyppiä ei ole pidetty hyvänä laadun ennustajana (Kärkkäinen 1980, Turkia ja Kellomäki 1987).

Koska metsikkötekijöillä ei voida kovin hyvin ennustaa puuston laatua, sopivia laadun ennustajia on haettu puutunnuksista. Kolmen puutekijän eli rinnankorkeusläpimitan, kuivaoksarajan ja kasvunopeuden nuoruusvaiheessa (vuosilustojen paksaus rungon tyven ytimen läheisyydessä) on katsottu ennustavan hyvin mäntytukkien laatua (ks. esim. Uusitalo 1995). Näistä kolmesta on parhaaksi yksittäiseksi ennustajaksi todettu kuivaoksaraja (esim. Kärkkäinen 1980, Uusitalo 1994).

Kuivaoksaraja määrittää puun rungossa kohdan, jonka alapuolelta saadaan periaatteessa oksatonta laattaa (I-tukkilaatuluokka). Latvusraja puolestaan muodostaa rajakohdan kuivaoksaisten ja sekaoksaisten (eläviä ja kuolleita oksia) vyöhykkeen välillä. Latvusrajaa käytetään yleensä ulkoisen laadun tunnuksena, sillä sekaoksaisten ja terveoksaisten vyöhykkeen raja latvuksen alueella on yleensä mahdollista arvioida pystypuusta.

Puuston latvussuhteen ja oksarajojen ennustamista erilaisista puu- ja metsikkötunnuksista ovat tutkineet mm. Kilkki (1983), Koivunen (1989) ja Hynynen (1995). Kilkki käytti latvussuhteen ennustamiseen ainoastaan puutunnuksia, Hynynen sen sijaan käytti selittävänä muuttujana myös puuston pohjapinta-alaa sekä valtapituutta. Koivusen mallissa puolestaan latvusrajan suhdetta pituuteen selitetään puun rinnankorkeusläpimitalla, metsikön iällä ja pohjapinta-alalla, lämpösummalla ja kasvupaikkatyyppillä. Kun oksarajatunnukset on arvioitu tai ennustettu puujoukolle, päästäneen laadun arvioinnissa jo huomattavasti luotettavampaan tulokseen. Erilaatuisten tukkien osuudesta rungossa saadaan tällöin arvio hyödyntämällä arvioituja oksarajoja apteerausalgoritmeissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisella menetelmällä tukkipuuston laatu saadaan luotettavimmin ennustettua maastossa mitattujen tietojen perusteella. Tutkimuksessa keskityttiin mäntyyn, jossa raaka-aineen laadun vaikutus sahatavaran arvoon on suurempi kuin esim. kuusella

(Kärkkäinen 1980). Tutkimuksessa vertailtiin menetelmiä ennen kaikkea tukkilaatuluokkien tilavuuksien oikeellisuuksien kannalta.

## 2 Aineisto

Tutkimusaineiston muodostivat Valtakunnallisen puututkimuksen (VAPU) (ks. Korhonen ja Maltamo 1990) aineistosta valitut 65 mäntykoealaa. Koealat on mitattu vuosina 1988–1994 (pl. vuodet 1991 ja -92). Koealoja valittaessa pyrittiin alueelliseen kattavuuteen. Tässä ei täysin onnistuttu, sillä VAPU-aineistosta saaduista mäntykoealoista suhteellisesti eniten oli maan eteläosista. Yhteensä koealoilla oli 1085 mäntyä, joista 205 oli kaatokoeputa (taulukko 1). Kuvassa 1 on esitetty kaatokoeputien rinnankorkeusläpimitan ja oksarajojen (latvusraja ja kuivaoksaraja) välinen suhde.

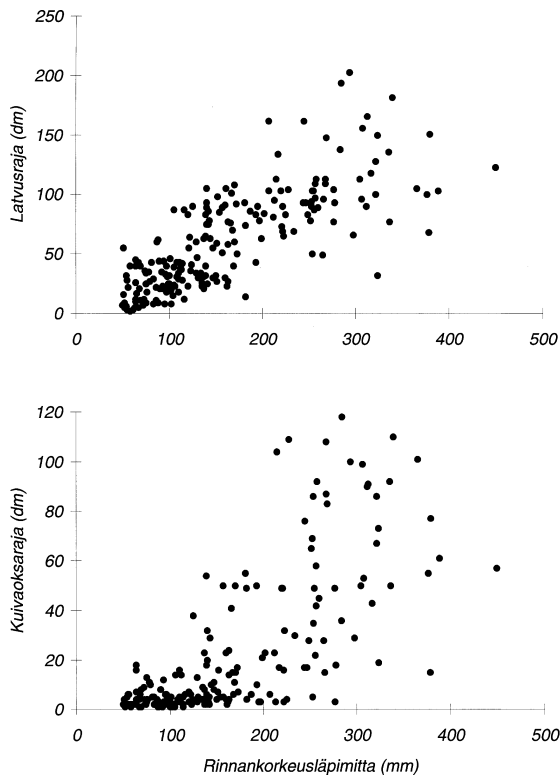
Eri laskentamenetelmiä testattiin myös otantatilanteessa. Testiaineistona käytettiin kahta Pohjois-

**Taulukko 1.** VAPU-aineiston kaatokoeputien metsä- ja puustotunnuksia ( $d$  rinnankorkeusläpimita,  $h$  pituus,  $h_c$  latvusraja,  $h_d$  kuivaoksaraja,  $d_{gM}$  pohjapinta-alamediaanipuun läpimita,  $T$  metsikön ikä ja  $G$  metsikön pohjapinta-ala).

	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
$d$ (mm)	162	87	50	450
$h$ (dm)	125	61	34	280
$h_c$ (dm)	61	42	2	203
$h_d$ (dm)	21	29	1	118
$d_{gM}$ (mm)	152	83	12	173
$T$ (a)	56	34	10	141
$G$ (m <sup>2</sup> /ha)	17	8	1	35

Koealat metsätyypeittäin ja kehitysluokittain:

Metsätyyppi	kpl	Kehitysluokka	kpl
OMT	5	Varttunut taimikko	6
MT	19	Nuori kasvatusmetsikkö	38
VT	34	Varttunut kasvatusmetsikkö	12
CT/karumpi	7	Uudistuskypsä metsikkö	9



**Kuva 1.** Kuivaoksarajamallin laadinta-aineiston rinnankorkeuslähimittan ja oksarajojen väliset suhteet.

Karjalasta mitattua koealaa (Jaamankangas, Kontiolahti ja Mekrijärvi, Ilomantsi), joista tiedettiin 'normaalien' metsä- ja puutunnusten lisäksi puiden sijainnit. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion suositusten (esim. SOLMU... 1996) mukaan Jaamankankaan metsikkö ei aivan täytä uudistamis-suositusta; Mekrijärven metsikköä voidaan pitää uudistuskypsänä (taulukko 2).

## 3 Menetelmät

### 3.1 Mallit ja optimointi

Tutkimuksessa tarvittu pituusestimaatit saatiin Veltheimin (1987) mallilla, jossa selittävinä muuttujina

**Taulukko 2.** Otannan simuloinneissa käytettyjen metsikköiden tunnuksia. Tunnukset selitety taulukossa 1.

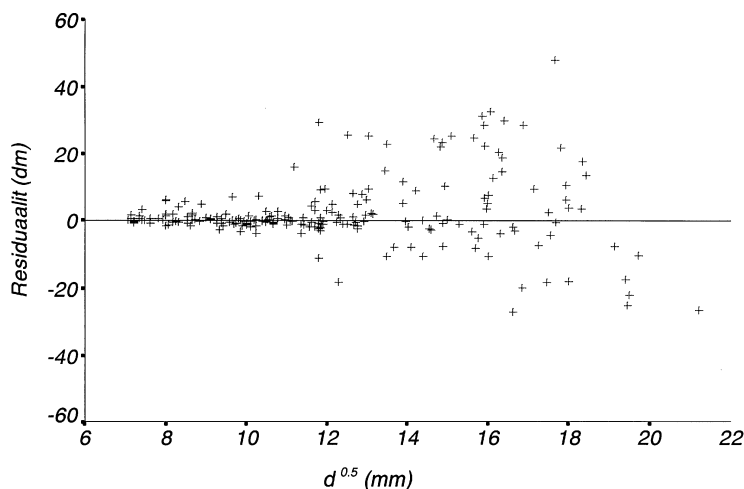
	Jaamankangas	Mekrijärvi
Alueen koko (ha)	1,00	1,53
Puiden määrä (kpl/ha)	479	367
Kasvupaikkatyyppi	VT	MT
$T$ (a)	80	95
$G$ (m <sup>2</sup> /ha)	19,96	22,77
Aritmeettiset keskiarvot (keskihajonnat)		
$d$ (cm)	22,70 (4,10)	28,20 (5,11)
$h$ (m)	19,40 (1,82)	22,00 (2,01)
$h_c$ (m)	11,60 (1,49)	13,90 (2,63)
$h_d$ (m)	3,00 (1,58)	7,10 (2,72)

ovat rinnankorkeuslähimitta ja puun kasvuympäristöä kuvaavia tunnuksia. Latvusraja laskettiin Koivusen (1989) sekamallilla.

Kuivaoksarajalle laadittiin tässä tutkimuksessa VAPU-aineiston kaatokoepuiden (205 kpl) perusteella puukohtainen sekamalli, jonka kiinteä osa on muotoa

$$\ln(h_d) = 0,177333 + 0,121583d^{0,5} - 0,441832(d/h) + 0,007773d_{gM} + 0,008634T - 0,032081G \quad (1)$$

missä  $h_d$  on kuivaoksarajan korkeus (dm),  $d$  on rinnankorkeuslähimitta (mm),  $h$  on pituus (dm),  $d_{gM}$  on pohjapinta-alamediaanipuun lähimitta (mm),  $T$  on metsikön ikä (a) ja  $G$  on pohjapinta-ala (m<sup>2</sup>/ha). Selittävien muuttujien kertoimien etumerkit ovat loogisia. Lähimittan, pohjapinta-alamediaanipuun lähimittan ja iän kasvaessa kuivaoksaraja nousee. Tyvekkyyden, jota tässä kuvaa lähimittan ja pituuden suhde, ja metsikön pohjapinta-alan vaikutus on päinvastainen. Malli tukee mainittujen tekijöiden vaikutuksen suuntaa männyn kuivaoksarajan korkeuteen aiemmissä tutkimuksissa (mm. Heikinheimo 1953, Heiskanen 1954, 1965, Kärkkäinen 1980). Koko mallin jäännösvarianssi on 0,154646, josta metsikköiden välistä vaihtelua on 41 % ja metsikköiden sisäistä vaihtelua 59 %. Metsikköiden välisen vaihtelun varianssikomponentin estimaatti on siten 0,063351 ja metsikköiden sisä-



Kuva 2. Laaditun kuivaoksarajamallin residuaalit  $d^{0.5}$ -selittäjän suhteen.

sen vaihtelun varianssikomponentin estimaatti 0,091295. Mallin käyttäytymistä selittävien muuttujien suhteen tarkasteltiin residuaalikuvioiden avulla. Kuvassa 2 esitetty tarkastelu läpimittatermin suhteen osoittaa heteroskedastisuutta, jonka takia mallissa käytettiin logaritmuunnosta.

Käytettyjä malleja kalibroitiin aineistoista mitatuilla koeputilla. Veltheimin (1987) pituusmallia kalibroitiin Päivisen (1987) esittämällä kaavalla:

$$\hat{h}_{ik} = \hat{h}_i \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{\sum_{j=1}^n \hat{h}_j} \quad (2)$$

missä  $n$  on pituuskoepuiden määrä,  $h_j$  koeputun mitattu pituus,  $\hat{h}_j$  koeputun mallilla laskettu pituus,  $\hat{h}_i$  lukupuun mallilla laskettu pituus ja  $\hat{h}_{ik}$  kalibroidulla mallilla saatu lukupuun pituusestimaatti. Latvusrajan ja kuivaoksarajan kalibrointi perustui yleiseen sekamallien kalibrointimalliin (Searle 1987, ks. Lappi 1993 s. 74). Mallien epälineaarisuuden vuoksi tarvittiin myös takaismuunnoksen harhatomuuskorjaus (ks. Lappi 1993 s. 91).

Tässä tutkimuksessa käytettyjen puutavaralajien hinnat ja dimensiot on esitetty taulukossa 3. Arvot ovat keskimääräisiä, joita suomalaiset suurehkot metsäyhtiöt ovat käyttäneet eri puutavaralajeille. Pienet ja erikoistuneet sahat käyttävät eri laatu-

**Taulukko 3.** Eri tukkilaatuluokkien hinnat ( $\text{mk}/\text{m}^3$ ) ja dimensiot. Kuitupuun hinta on  $60 \text{ mk}/\text{m}^3$ , minimiläpimitä  $7 \text{ cm}$  ja pituus  $30\text{--}50 \text{ dm}$ . Hukkapuun hinta on  $0 \text{ mk}/\text{m}^3$ .

d, cm	I-luokka ( $\text{mk}/\text{m}^3$ )	II-luokka ( $\text{mk}/\text{m}^3$ )	III-luokka ( $\text{mk}/\text{m}^3$ )	Pituus, dm
15–25*	180	150	145	40–54**
	185	160	150	55
	180	150	145	56–61
>25	190	170	155	40–54**
	200	176	160	55
	190	170	155	56–61

\* I-luokka: 20–25 cm

\*\* I-luokka: 37–54 dm

dimensiokriteereitä, joihin ei tässä tutkimuksessa puututa.

Tässä tutkimuksessa puiden tilavuuksien laske-  
misessa käytettiin runkokäyriä, ja rungon laatua kuvattiin laatuindikaattoreilla, joina käytettiin oksikkuustietoja. Läpimitat rungon eri korkeuksilla laskettiin Laasasenahon (1982) runkokäyrän avulla, jossa selittäjinä olivat puun pituus ja rinnankorkeusläpimita. Ratkaisevat tekijät, jotka vaikuttivat mihin luokkaan puun tukkiosa kuului, olivat mini-

miläpimitta ja elävien ja kuolleiden oksien sijainti. Kuitupuuosan suuruuden määräsi läpimitta (läpimitta vähintään määrätty kuitupuun läpimitta) ja tukkiosan päättymiskorkeus. Loppuosa rungosta oli hukkapuuta.

Laatuluokitus noudatti periaatetta, jossa runko jaetaan sahatavaraan ja kuitupuuhun läpimittojen ja oksien sijainnin perusteella. Tukkikokoisesta rungosta voidaan tällöin saada kolmenlaista tukkia: I-luokan tukit ovat oksattomia, II-luokan tukeissa voi olla eläviä oksia ja III-luokan tukeissa sekä kuolleita että eläviä oksia. I-luokan tukit ovat arvokkaimpia ja III-luokan tukit arvottomimpia (ks. taulukko 3).

Rungon optimointi eri puutavaralajeihin tehtiin dynaamisella optimoinnilla (ks. esim. Bellman 1957). Dynaaminen optimointi on tullut viime aikoina suosituksi yksittäisten runkojen optimaalisen pölkkytyksen ratkaisemisessa (esim. Näsberg 1985, Goulding ym. 1993, Ahonen ja Mäkelä 1995, Puumalainen 1997). Tässä tutkimuksessa dynaamisen optimoinnin algoritmi alkoi apteerata puuta kannonkorkeudelta (10 cm) ja eteni latvaan saakka käyttäen yhden desimetrin väliä niin että rungon arvo optimoitui (Puumalainen 1997). Kyseessä oli siis optimointi eteenpäin (forward reaching algorithm). Optimointialgoritmissa kuivaoksaraja muodosti teoreettisen rajakohdan I- ja III-laadun välille ja latvusraja II- ja III-laadun välille.

### 3.2 Koealakohtaiset laskelmat

VAPU-koealojen puuston teoreettiset läpimittaja-kaumat muodostettiin Weibull-jakauman avulla. Parametrit jakaumaan saatiin seuraavasti (Mykkänen 1986):

$$\ln(a) = -1,306454 + 1,154433\ln(d_{gM}) \quad (3)$$

$$\ln(c) = 0,647888 - 0,005558G + 0,025530d_{gM} \quad (4)$$

$$b = \frac{(d_{gM} - a)}{(-\ln(0,5))^{1/c}} \quad (5)$$

missä  $d_{gM}$  on pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta (cm) ja  $G$  on kuvion pohjapinta-ala ( $m^2/ha$ ).

Kunkin läpimittaluokan frekvenssi saatiin Weibull-jakauman kertymäfunktioista läpimittaluokan ylä- ja alarajan erotuksena ja kuvauspuun läpimittana käytettiin kunkin luokan keskikohdan läpimittaa. Läpimittaluokan leveys oli yksi senttimetri. Pohjapinta-alajakauma muutettiin edelleen läpimittaluokittaiseksi runkoluvuksi jakamalla kunkin luokan pohjapinta-ala yhden puun pohjapinta-alalla.

Puille laskettiin tämän jälkeen muut tunnuksset. Aluksi kokeiltiin menetelmää, jossa käytettiin Veltheimin (1987) pituusmallia, Koivusen (1989) latvusrajamallia ja tämän tutkimuksen kuivaoksarajamallia (kaava 1). Jokaista mallia kalibroitiin keskipuun kyseisen tunnuksen arvolla. Toisessa menetelmässä käytettiin edellä mainittuja malleja, mutta vain pituusmalli kalibroitiin keskipuun pituudella, oksarajat (kuivaoksaraja ja latvusraja) laskettiin kalibroimattomilla oksarajamalleilla. Oksarajojen määrittämisessä kokeiltiin myös menetelmää, jossa keskipuusta mitatut latvus- ja kuivaoksaraja annettiin kaikille koealan puille. Ko. menetelmässä pituusmalli kalibroitiin keskipuun pituudella. Viimeisessä menetelmässä käytettiin kalibroitua pituusmallia, mutta ei ollenkaan oksarajamalleja. Ensimmäisessä menetelmässä siis hyödynnetään sekä mallien muodossa olevaa ennakkotietoa puuston latvusrajoista, että kuviolta mitattua tietoa (malli + mittaus). Toisessa (malli) ja kolmannessa (mittaus) menetelmässä hyödynnetään jompaa kumpaa ja viimeisessä menetelmässä ei kumpaakaan (nyky).

Ensimmäisissä kolmessa menetelmässä käytettiin rungon eri osien tilavuuksien laskennassa Puumalaisen (1997) apteerausalgoritmia. Todellisina tilavuuksina pidettiin mitatuilla läpimitoilla, pituuksilla, latvus- ja kuivaoksarajoilla laskettuja tuloksia. Viimeisessä menetelmässä, joka vastaa yleistä käytäntöä (PMP), tilavuudet saatiin käyttämällä PMP-systeemin (PMP-ohje 1982) mukaista apteerausalgoritmia, sillä Puumalaisen (1997) apteerausalgoritmi vaatii tiedot oksarajojen sijainnista. Tällöin ei saatu tietoa eri tukkilaatujen määrästä vaan ainoastaan kokonaistukkitilavuus.

Tuloksien hyvyyden testauksessa käytettiin keskineliövirhettä (RMSE) ja harhaa. Ko. tunnuksset laskettiin kokonaistilavuudelle, tukkitilavuudelle, eri tukkilaatuluokkien tilavuuksille ja kuitutilavuudelle. Keskineliövirhe laskettiin kaavalla

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (6)$$

missä  $x_i$  on mitattu tai mitattujen tietojen perusteella laskettu arvo (kokonaistilavuus, tukkitilavuus jne.) kuviolla  $i$ ,  $\hat{x}_i$  on ennustettu arvo ko. muuttujalle kuviolla  $i$  ja  $n$  on kuvioiden lukumäärä.

Harha laskettiin seuraavasti (merkinnät kuten kaavassa 6):

$$\text{Harha} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)}{n} \quad (7)$$

### 3.3 Metsikkökohtaiset laskelmat

Menetelmiä testattiin otantatilanteessa kahdessa Pohjois-Karjalassa sijaitsevassa metsikössä (Jaamankangas ja Mekrijärvi). Metsiköihin, joiden puiden sijainnit tiedettiin, simuloitiin satunnaisesti relaskooppikoealoja kertoimella 2. Kokeilluissa menetelmissä oletettiin, että relaskooppikoealojen jokaisen puun rinnankorkeusläpimitta on tiedossa. Tällä perusteella laskettiin eri läpimittaisten puiden määrä hehtaarilla Kuuselan (1966) kaavalla.

Muut puutunnukset oletettiin mitatuiksi tai ne laskettiin malleilla. Kun relaskooppikoealan puiden läpimitat, pituudet ja latvusrajat sekä kuivaoksarajat oli saatu määritettyä, optimoitiin runko Puumalaisen (1997) apteerausalgoritmilla ja laskettiin hehtaarikohtaiset tulokset. Laskettuja tuloksia verrattiin ko. metsikön mitatuilla tiedoilla laskettuihin tuloksiin, jotka saatiin optimoimalla metsikön jokainen runko ja muuttamalla runkojen yhteenlasketut tilavuudet hehtaarikohtaisiksi tilavuukiksi.

Mekrijärven aineistossa kokeiltiin eri mittauskombinaatioiden ohella systemaattisesti sijoitettujen koealojen määrän vaikutusta tuloksiin. Vertailuissa käytetyt koealamäärät olivat 2, 4, 6 tai 8 koealaa.

Laskennassa käytettiin seuraavia menetelmiä/mitausyhdistelmiä:

*Vertailu.* Kaikkien relaskooppikoealalla olevien puiden puutunnukset oletettiin mitatuiksi. Kaikista puista tiedettiin siis rinnankorkeusläpimitta, pituus, latvus- ja kuivaoksaraja. Metsikön hehtaarikohtaiset tulokset

laskettiin yhden koealan perusteella, ja laskenta toistettiin sata kertaa. Menetelmän odotusarvona pidettiin toistojen keskiarvoa. Menetelmää käytettiin vertailukohtana, joka kuvaa pelkän otantavirheen vaikutusta. *Malli + mittaus.* Tässä menetelmässä vain kaikkien relaskooppikoealalla olevien puiden läpimitat tunnetaan, pituudet ja latvus- ja kuivaoksarajat lasketaan malleilla, jotka on kalibroitu kunkin koealan keskipuun arvoilla.

*Malli.* Läpimitat kaikista puista tunnetut, pituusmalli kalibroitu koaloittain keskipuulla ja oksarajat suoraan malleilla (ts. ei kalibrointia).

*Mittaus.* Läpimitat kaikista relaskooppikoealan puista, pituusmalli kalibroitu koaloittain keskipuun pituudella ja oksarajoiksi jokaiselle koealan puulle koealan keskipuun oksarajat.

## 4 Tulokset

### 4.1 Koealakohtaiset tulokset

VAPU-koealoille (yhteensä 65 kappaletta) laskettiin mitatun puuston perusteella hehtaarikohtaiset tulokset, joista on yhteenveto taulukossa 4. Koealoille laskettiin teoreettiseen läpimittajakaumaan perustuvat hehtaarikohtaiset tulokset eri mittaus- ja mallikombinaatioilla. Menetelmien tulosten ja mitatuilla arvoilla laskettujen tulosten perusteella saatiin keskineliövirheet ja harhat (taulukko 5).

PMP-systeemin antama tulos (nyky) oli likipitään

**Taulukko 4.** VAPU-koealojen keskitunnuksia, kun kaikki puutunnukset mitattu ja puut arvoapteerattu dynaamisen optimoinnin algoritmilla (m<sup>3</sup>/ha, arvo mk/ha).

	Keskiarvo	Minimi	Maksimi	Keskihajonta
$V_{\text{kok}}$	104,48	11,31	307,92	72,86
$V_{\text{tukki}}$	58,03	0,00	275,01	73,16
$V_{\text{I-laatu}}$	15,00	0,00	156,20	33,80
$V_{\text{II-laatu}}$	3,27	0,00	35,57	7,23
$V_{\text{III-laatu}}$	39,76	0,00	227,67	49,97
$V_{\text{kuitu}}$	39,46	0,00	140,01	32,24
Arvo	11668,80	0,00	44610,27	11869,81

**Taulukko 5.** Harhat ja keskineliövirheet (RMSE:t) VAPU-kuvioille, kun erilaisia mittaustenmenetelmiä käytetään. Menetelmät selitetty tekstissä.

	Malli + mittaus		Malli		Mittaus		Nyky	
	Harha	RMSE	Harha	RMSE	Harha	RMSE	Harha	RMSE
$V_{\text{kok}}$	-9,76	12,59	-9,76	12,59	-9,76	12,59	-9,76	12,59
$V_{\text{tukki}}$	-7,23	13,40	-6,98	13,03	-7,82	14,13	-6,99	13,64
$V_{\text{I-luokka}}$	-2,51	14,54	-4,70	25,07	0,68	12,21		
$V_{\text{II-luokka}}$	0,08	4,21	-0,62	5,14	-1,84	6,16		
$V_{\text{III-luokka}}$	-4,80	18,05	-1,66	27,07	-6,66	18,49		
$V_{\text{kuitu}}$	-2,47	7,53	-2,70	7,35	-1,94	7,95	4,20	9,27

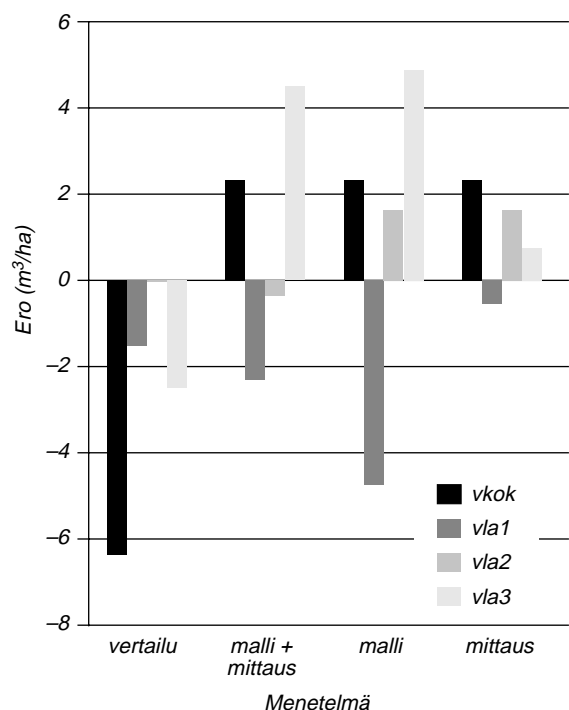
sama kuin dynaamisen optimoinnin menetelmissä (malli + mittaus, malli ja mittaus). Huomion arvoiseksi tämän tekee se, että dynaaminen optimointi käytti luokkavälinä yhtä desimetriä, PMP-systeemi kolmea desimetriä. Menetelmä, jossa käytetään sekä mittaus- että mallitietoa puuston oksarajoista antaa paremmat tulokset arvokkaimmille laatuluokille (laatuluokat I ja II) kuin menetelmä, jossa käytetään pelkkää malli-informaatiota. Tämä on loogista, sillä ensinmainitussa menetelmässä kalibroitiin oksarajoja, ja käytössä oli siis enemmän informaatiota. Kalibroimattoman mallin käyttö antoikin selkeästi heikoimmat tulokset.

Menetelmässä, jossa ei käytetty ollenkaan oksarajamalleja vaan keskipuun oksarajat yleistettiin kaikille koealan puille, saatiin tarkimmat tulokset I-laatuluokalle. Muissakin laatuluokissa menetelmällä saatiin lähes yhtä hyvät tulokset kuin parhaalla menetelmällä.

#### 4.2 Metsikkökohtaiset tulokset

Jaamankankaan ja Mekrijärven koaloilla kokeiltiin erilaisten mittaussyhdistelmien ja koealojen määrän vaikutusta kuviolta saataviin tilavuus- ja arvoestimaatteihin. Molemmissa aineistoissa kokeiltiin neljää satunnaisiin koaloihin perustuvaa menetelmää. Kaikissa tapauksissa tehtiin 100 toistoa.

Jaamankankaan aineistossa kokeiltiin kaikkia esiteltyjä menetelmiä (taulukko 6). Satunnaisen koealan tapauksissa harhattomimmin arvokkaimman tukkiluokan, eli luokan I, tilavuus saatiin menetelmällä, jossa relaskooppikoealan kaikkien puiden



**Kuva 3.** Mitatuilla tiedoilla ja eri menetelmillä laskettujen tilavuuksien erot (menetelmällä saatu tulos – mitatuilla tiedoilla saatu tulos, m<sup>3</sup>/ha) Jaamankankaan metsikössä. Menetelmät selostettu tekstissä (vkok viittaa puuston kokonaistilavuuteen, vla1 I-laatuluokan tilavuuteen, vla2 II-laatuluokan tilavuuteen ja vla3 III-laatuluokan tilavuuteen).



**Taulukko 6.** Mitatuilla tiedoilla lasketut ja eri menetelmillä relaskooppikoealoilta (relaskooppikerroin 2, 100 toistoa) saadut tilavuudet (m<sup>3</sup>/ha) sekä puuston arvot (mk/ha) Jaamankankaan metsikössä. Menetelmät selitety tekstissä. Ero prosentteina suluissa.

	Mitatuilla tiedoilla lasketut	Vertailu	Malli + mittaus	Malli	Mittaus
V <sub>kok</sub>	192,92	186,53 (-3,3)	195,25 (1,2)	195,25 (1,2)	195,25 (1,2)
V <sub>tukki</sub>	159,74	155,62 (-2,6)	161,55 (1,1)	161,55 (1,1)	161,51 (1,1)
V <sub>I-luokka</sub>	6,89	5,33 (-22,6)	4,57 (-33,7)	2,14 (-68,9)	6,31 (-8,4)
V <sub>II-luokka</sub>	2,10	2,07 (-1,4)	1,74 (-17,1)	3,74 (78,1)	3,76 (79,0)
V <sub>III-luokka</sub>	150,75	148,22 (-1,7)	155,24 (2,9)	155,65 (3,2)	151,44 (0,4)
V <sub>kuitu</sub>	31,21	29,05 (-6,9)	31,79 (1,8)	31,80 (1,9)	31,83 (2,0)
Arvo	25819,67	25035,44 (-3,0)	26062,74 (0,9)	25994,28 (0,7)	26130,55 (1,2)

**Taulukko 7.** Mitatuilla tiedoilla lasketut ja eri menetelmillä satunnaisesti sijaitsevilta relaskooppikoealoilta (relaskooppikerroin 2, 100 toistoa) saadut tilavuudet (m<sup>3</sup>/ha) sekä puuston arvot (mk/ha) Mekrijärven metsikössä. Menetelmät selitety tekstissä. Ero prosentteina suluissa.

	Mitatuilla tiedoilla lasketut	Vertailu	Malli + mittaus	Malli	Mittaus
V <sub>kok</sub>	233,13	245,73 (5,4)	255,31 (9,5)	255,31 (9,5)	255,31 (9,5)
V <sub>tukki</sub>	214,80	225,97 (5,2)	234,33 (9,1)	234,33 (9,1)	234,16 (9,0)
V <sub>I-luokka</sub>	94,06	96,90 (3,0)	68,95 (-26,7)	31,53 (-66,5)	100,45 (6,8)
V <sub>II-luokka</sub>	6,26	6,62 (5,8)	8,41 (34,3)	14,18 (126,5)	10,09 (61,2)
V <sub>III-luokka</sub>	114,48	122,45 (7,0)	156,97 (37,1)	188,72 (64,8)	123,62 (8,0)
V <sub>kuitu</sub>	17,06	18,48 (8,3)	19,65 (15,2)	19,54 (14,5)	19,81 (16,1)
Arvo	37062,00	38957,59 (5,1)	39223,45 (5,8)	37955,68 (2,4)	40471,43 (9,2)

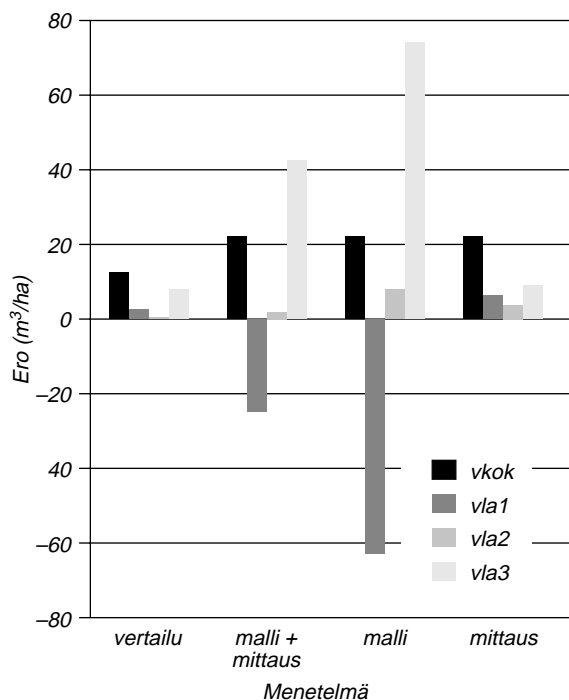
läpimitat tunnettiin, Veltheimin (1987) pituusmalla kalibroitiin koealan keskipuun mitatulla pituudella ja latvuksen oksarajat saatiin yleistämällä keskipuun oksarajat kaikille koealan puille (mittausmenetelmä). Heikoin menetelmä ko. kriteerillä oli menetelmä, jossa läpimitat ja pituudet saatiin kuten edellä, mutta puun oksarajojen estimointiin käytettiin kalibroimattomia oksarajamalleja.

Puuston kokonaistilavuuden ja arvon osalta menetelmät antoivat lähes harhattomia tuloksia. Kaikki menetelmät antoivat pieniä aliarvioita I-laatu luokan suhteen (kuva 3). II-laatu luokassa menetelmät antoivat sekä yli- että aliarvioita. Suurimmat absoluuttiset erot mitatun ja eri menetelmillä laskettujen tilavuuksien kohdalla tuli arvottomimmassa

eli III-laatu luokassa lukuunottamatta menetelmää, jossa käytettiin pelkkää mittaustietoa.

Mekrijärven aineistossa (taulukko 7, kuva 4) saatiin yhtenevät tulokset Jaamankankaan aineiston tulosten kanssa. Mittauksiin perustuva menetelmä oli tässäkin tapauksessa paras käytettäessä kriteerinä I-laatu luokan tilavuutta, ellei oteta huomioon vertailumenetelmää. Puuston arvoerot mitattuun olivat selkeästi suurempia kuin Jaamankankaan aineistossa. Tämä johtui ennen kaikkea siitä, että kokonaistilavuusestimaatit olivat selviä yliarvioita.

Vertailujen menetelmien keskivirheet on esitetty taulukossa 8. Vertailumenetelmän virhe edustaa pelkkää otantavirhettä. Kun tähän verrataan muilla menetelmillä saatuja tuloksia, saadaan selville mal-



**Kuva 4.** Mitatuilla tiedoilla ja eri menetelmillä laskettujen tilavuuksien erot (menetelmällä saatu tulos – mitatuilla tiedoilla saatu tulos, m<sup>3</sup>/ha) Mekrijärven metsikössä. Menetelmät selostettu tekstissä (vkok, vla1, vla2 ja vla3 kuten kuvassa 3).

lien käytön aiheuttama virhe, joka tulee esille eri laatuluokkien kohdalla. Myös keskivirheen osalta kalibroimattomien oksarajamallien käyttö antoi heikoimmat tulokset. Oksarajamallien kalibrointi pienentää mallien käytöstä aiheutuvaa virhettä selväs-

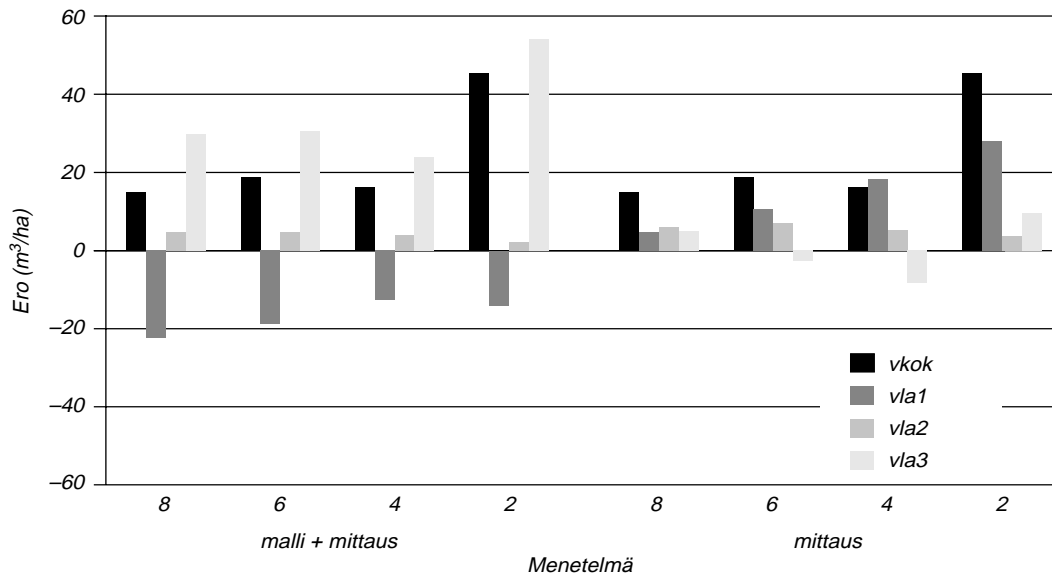
ti, lukuunottamatta Jaamankankaan I-laadun määrää. Keskivirheen osalta pelkkää mittaustietoa hyödyntävä malli antoi joissakin tapauksissa melko huonojakin tuloksia. Vaikka tässä menetelmässä metsikkökohtainen harha on pieni, voi menetelmän varianssi olla suuri.

Koealojen määrän vaikutusta tulosten luotettavuuteen vertailtiin Mekrijärven metsikössä neljällä eri koealamäärällä ja kahdella eri laskentamenetelmällä tehdyillä simuloinneilla. Käytettäessä systemaattista otantaa ja malleihin sekä mittaustietoon perustuvaa menetelmää havaittiin, että kaksi relaskoopikoealaa ko. alueelle (pinta-ala 1,53 ha) on liian vähän (taulukko 9, kuva 5). Neljän, kuuden ja kahdeksan koealan välillä ei ole tuloksissa suuria eroja kokonaistilavuuden ja arvon osalta. Laatuja-kauman estimaatit sen sijaan vaihtelivat koealamäärän mukaan. Neljällä koealalla päästiin lähimmäksi mitattua arvoa (kriteerinä I-laatuluokan tilavuus), kahdeksan koealan käyttö johti suurimpaan eroon. Tämä osoittaa, että koealamäärän kasvattaminen voi huonontaa tuloksia, jos oksarajojen kalibrointi ei toimi.

Kun mallien käyttö rajoitettiin vain pituuden estimointiin ja oksarajatiedot saatiin keskipuun tiedot yleistämällä, saatiin erilaiset tulokset tukkien laatuja-kauman osalta (taulukko 10). Ensinnäkin tulokset olivat lähempänä mitattuja tuloksia arvokkaimman laatuluokan eli I-luokan kohdalla kahdeksan ja kuuden koealan tapauksessa. Toiseksi, tässä tapauksessa koealojen lisääminen paransi tulosta I-laatuluokan osalta. Puuston arvokin oli lähimpänä mitattua kahdeksan koealan tapauksessa, joskin erot olivat pieniä (pl. kahden koealan tapaus).

**Taulukko 8.** Keskineliövirheet (RMSE:t) Jaamankankaan ja Mekrijärven metsiköissä (m<sup>3</sup>/ha) eri menetelmillä.

	Jaamankangas				Mekrijärvi			
	Vertailu	Malli + mittaus	Malli	Mittaus	Vertailu	Malli + mittaus	Malli	Mittaus
V <sub>tukki</sub>	44,24	45,88	45,96	45,91	72,35	76,95	76,93	76,79
V <sub>I-laatu</sub>	6,66	12,36	7,52	17,35	46,16	49,49	70,67	64,60
V <sub>II-laatu</sub>	2,28	2,75	4,15	4,94	6,43	8,98	11,10	12,93
V <sub>III-laatu</sub>	41,44	50,69	50,69	49,32	42,27	90,85	121,25	61,05



**Kuva 5.** Mitatuilla tiedoilla ja eri menetelmillä laskettujen tilavuuksien erot (menetelmällä saatu tulos – mitatuilla tiedoilla saatu tulos, m<sup>3</sup>/ha) Mekrijärven metsikössä eri koealamäärillä ja kahdella eri laskentatavalla. Menetelmät selostettu tekstissä (vkok, vla1, vla2 ja vla3 kuten kuvassa 3).

**Taulukko 9.** Mitatuilla tiedoilla lasketut ja systemaattisesti sijaitsevilta relaskoopikoealoilta (relaskoopikerroin 2, 100 toistoa) saadut tilavuudet (m<sup>3</sup>/ha) sekä puuston arvot (mk/ha) Mekrijärven metsikössä eri koealamäärillä käyttäen sekä mittaus- että mallitietoa. Ero prosentteina suluissa.

	Mitatuilla tiedoilla lasketut	Relaskoopikoealoilta saadut arvot			
		Koealoja			
		8	6	4	2
V <sub>kok</sub>	233,13	248,35 (6,5)	252,37 (8,3)	249,88 (7,2)	279,03 (19,7)
V <sub>tukki</sub>	214,80	227,12 (5,7)	231,36 (7,7)	230,56 (7,3)	256,32 (19,3)
V <sub>I-laatu</sub>	94,06	71,53 (-24,0)	74,95 (-20,3)	81,07 (-13,8)	79,50 (-15,5)
V <sub>II-laatu</sub>	6,26	11,08 (88,5)	10,95 (74,9)	10,40 (66,1)	8,43 (34,7)
V <sub>III-laatu</sub>	114,48	144,51 (26,2)	145,46 (27,1)	139,09 (21,5)	168,39 (47,1)
V <sub>kuitu</sub>	17,06	20,00 (17,2)	19,73 (15,7)	18,09 (6,0)	21,21 (24,3)
Arvo	37062,00	38335,51 (3,4)	39106,55 (5,5)	39060,88 (5,4)	42894,34 (15,7)

Kaikilla menetelmillä ja koealamäärillä saadut estimaatit kokonaistilavuudelle olivat yliarvioita (kuvat 4 ja 5). Eri laatuluokkia tarkasteltaessa havaittiin, että II-laatuluokan tilavuus oli jokaisessa menetelmässä yliarvioitu ja muut, so. I- ja III- laatuluokat, olivat menetelmästä riippuen joko yli- tai aliarvioita.

## 5 Tarkastelu

Tässä tutkimuksessa testattiin erilaisia menetelmiä, joilla voitaisiin parantaa kuvioittaista arviointia ottamalla huomioon puun ulkoiset laatutekijät. Tavoitteena oli, että menetelmät olisivat helposti ku-

**Taulukko 10.** Mitatuilla tiedoilla lasketut ja systemaattisesti sijaitsevilta relaskooppikoaloilta (relaskooppikerroin 2, 100 toistoa) saadut tilavuudet ( $m^3/ha$ ) sekä puuston arvot ( $mk/ha$ ) Mekrijärven metsikössä eri koelamäärillä käyttäen pelkkää mittaustietoa. Ero prosentteina suluissa.

	Mitatuilla tiedoilla lasketut		Relaskooppikoalojen perusteella laskettu Koaloja			
	8	6	4	2		
$V_{kok}$	233,13	248,35 (6,5)	252,37 (8,3)	249,88 (7,2)	279,03 (19,7)	
$V_{tukki}$	214,80	230,44 (7,3)	230,95 (7,5)	230,79 (7,4)	256,55 (19,4)	
$V_{I-laatu}$	94,06	98,76 (5,0)	105,01 (11,6)	112,88 (20,0)	122,20 (29,9)	
$V_{II-laatu}$	6,26	12,16 (94,2)	13,38 (113,7)	11,86 (89,5)	9,93 (58,6)	
$V_{III-laatu}$	114,48	119,52 (4,4)	112,56 (-1,7)	106,05 (-7,4)	124,42 (8,7)	
$V_{kuitu}$	17,06	16,67 (-2,3)	20,13 (18,0)	18,44 (8,1)	20,94 (22,7)	
Arvo	37062,00	39701,33 (7,1)	40268,23 (8,7)	40258,37 (8,7)	44663,93 (20,5)	

vioittaiseen arviointiin sovitettavissa. Tutkimuksen VAPU-koaloja ja Weibull-jakaumaa käyttävää osaa voidaan pitää tutkimuksen varsinaisena kuvioittaisen arvioinnin osana. Vertailukohtana on nykyistä käytäntöä vastaava menetelmä, jossa puujoukko muodostetaan jakauman avulla, puiden pituudet kalibroidaan ja minkäänlaista oksarajatietoa ei käytetä. Kahdella kartoitetulla metsikköaineistolla tehdyt simulointien kuvaamat otannat ovat taas mittaussellisesti raskaampia. Otantaan perustuvat menetelmät soveltuvat lähinnä kuvioittaista arviointia tarkempia tietoja vaativaan leimikon ennakkomittaukseen.

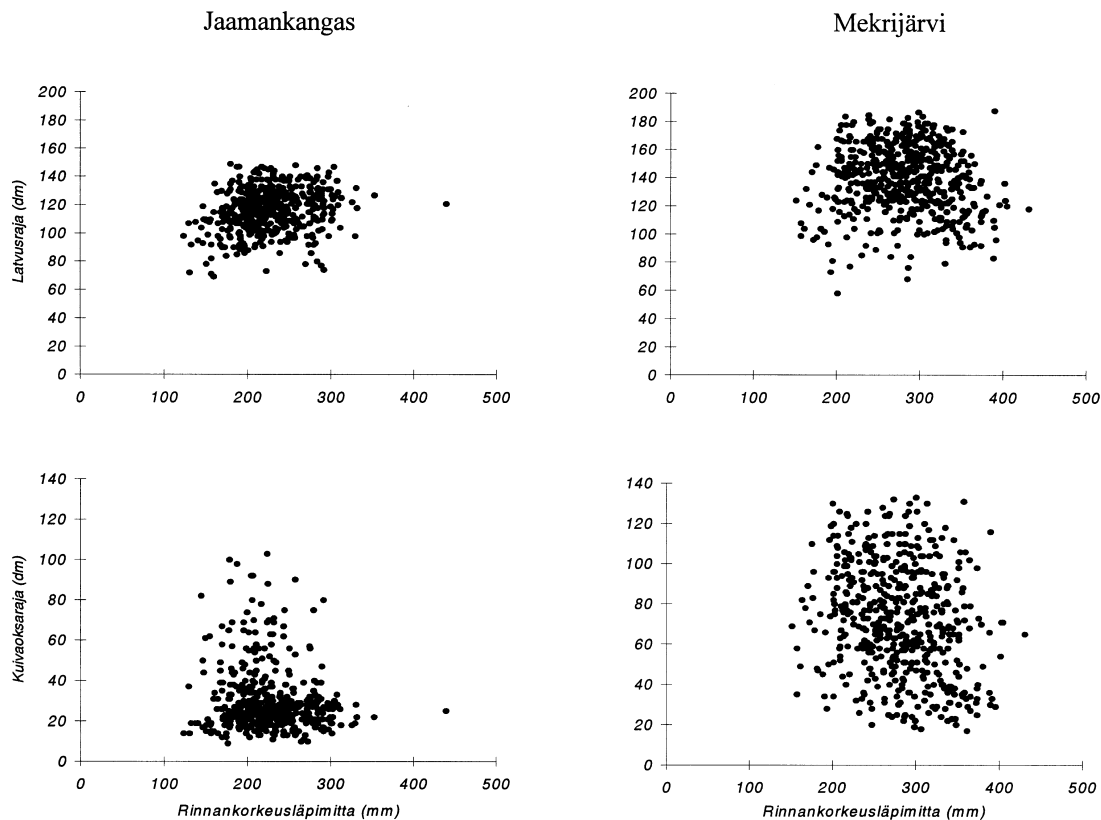
VAPU-kuvioiden kokonaistilavuuksia tarkasteltaessa havaitaan, että Weibull-jakaumalla muodostetun läpimittajakauman ja Veltheimin (1987) mallilla estimoidun pituuden antama tilavuus on yliarvio. Kalibrointi parantaa ennustetta, mutta tulokset ovat siitä huolimatta yliarvioita. Yksi syy siihen voi olla, ettei käytetty pituusmalli ole välttämättä oikean muotoinen yksittäiselle metsikölle, vaikka se sopiikin laajemman alueen aineistoon. Muun muassa Hagberg (1939, ks. Loetsch ym. 1973) on todennut, että läpimitan ja pituuden välinen riippuvuus on eri muotoista yksittäisen metsikön kohdalla tarkasteltuna kuin useasta metsiköstä koostuvan aineiston avulla tarkasteltuna. Korhonen (1991) on tutkimuksessaan todennut, että käytetty yleinen pituuskaikäyrä on yksittäiselle metsikölle liian jyrkkä, jolloin kalibrointi ei välttämättä paranna ennusteita. Toinen mahdollinen syy yliarvioihin on, ettei

pituusmalli sovellu kovin hyvin rannikkoon painottuneilla VAPU-koaloilla.

Oksarajojen malleissa tilanne on vielä selvempi kuin pituuden mallissa. Oksarajat vaihtelevat yksittäisten metsiköiden sisällä vähemmän kuin yleisten oksarajamallien (Koivunen 1989 ja kaava 1) perusteella voisi olettaa. Latvusraja on helpommin ennustettavissa kuin kuivaoksaraja (ks. esim. Koivunen 1989). Latvusraja korreloi edes jonkin verran esim. läpimitan kanssa, kuivaoksaraja vaikuttaa olevan melko satunnainen läpimitan suhteen. Kärkkäinen (1985) toteaa, että ”Suomen oloissa voi olettaa, että oksattoman osan pituus kasvaa männyllä ja koivulla likimain suoraviivaisesti rinnankorkeusläpimitan suuretessa”. Tämä ei yksittäisissä metsiköissä (Jaamankangas ja Mekrijärvi) näyttäisi pitävän paikkaansa (kuva 6). Myös VAPU-aineistossa kuivaoksarajan ja läpimitan suhde on melko epämääräinen (kuva 1).

Kun käytettyä yleistä oksarajamallia kalibroiden, että vain tasoa korjataan, voi ennusteiden luotettavuus entisestään huonontua. Tällaisen mallin kalibroinnissa pitäisi pystyä korjaamaan myös mallin muotoa. Tällöin oksarajamallissa myös läpimitan kerroin voisi olla satunnainen, jolloin sitäkin voisi kalibroida (esim. Lappi 1991).

Toinen mahdollisuus oksarajamallien tapauksessa on, että käytetyt mallit eivät alun perinkään kuvaa tarkasteltavaa ilmiötä oikein. Tällöin joillakin muilla malleilla kuin nyt käytetyillä voitaisiin saada paremmat tulokset. Tulokset kuitenkin kertovat,



**Kuva 6.** Rinnankorkeusläpimitan ja oksarajojen väliset suhteet Jaamankankaan ja Mekrijärven koealoilla.

että oksarajojen tulisi vaihdella metsiköittäin melko vähän läpimitan suhteen, suuri osa vaihtelusta lienee metsiköiden välistä vaihtelua (esim. Kilkki 1983). Tällöin malli voitaisiin rakentaa niin, että läpimitan kerroin on kiinteä, mutta se riippuu metsikkötunnuksista, kuten pohjapinta-alasta.

Vielä yksi mahdollisuus oksarajatietojen yleistämiseksi olisi ei-parametristen menetelmien, kuten esim. k:n lähimmän naapurin -menetelmän, soveltaminen. Menetelmän käyttökelpoisuutta selvitetään parhaillaan Joensuun yliopistossa tehtävässä oppinnäytetyössä.

Jaamankankaan ja Mekrijärven aineistoissa tehdyt relaskooppikoealasimuloinnit antavat tietoa, miten erilaiset mittauskombinaatiot toimivat koealojen puiden läpimittojen ollessa tiedossa. Mitään menetelmää ei voi pitää ylivertaisena muihin näh-

den. Mikäli tulosten harhattomuus asetetaan pääkriteeriksi, parhaiten kuvioittaisessa arvioinneissa käyttökelpoisista menetelmistä näyttäisi esimerkiksi kilaskelmien tapauksessa soveltuvan puuston laadun, nimenomaan arvokkaimman I-laadun, arviointiin menetelmät, joissa relaskooppikoealan keskipuun oksarajat yleistetään kaikille relaskooppikoealan puille. Menetelmän toimivuus perustuu nimenomaan siihen, että oksarajan vaihtelusta suuri osa on metsiköiden välistä vaihtelua. Menetelmän varianssi on kuitenkin melko suuri verrattuna malleihin perustuviin laskentajärjestelmiin.

Tukkien laatuluokkiin jakautumista yleisesti tarkasteltaessa havaitaan, että absoluuttisesti tarkimmat tulokset eri laatuluokista saadaan tavallisesti II-laadulle eli tuoreoksiselle laadulle (kuvat 3, 4 ja 5). Tähän on monta selitystä. Ensimmäinen ja

hyvin luonnollinen selitys on, että ko. laatuluokan tilavuus on pieni. Toiseksi, luokan toisen katkaisukohdan rungossa määrää rungon läpimitta eli tukkipuun minimiläpimitta (ei mikään ennustettu kohta). Lisäksi latvusrajamalli, joka määrää toisen katkaisukohdan, on luotettavampi kuin I- ja III-laadun määrään vaikuttava kuivaoksarajamalli. I-laadulla on myös toinen katkaisukohta määrätty, mutta toisen katkaisukohdan määräävä kuivaoksaraja osoitautui hankalasti mallilla määritettäväksi tunnuksiksi puutasolla. Absoluuttisesti I-laadun virheen suuruus on tavallisesti II- ja III-laadun välissä. Suurimmat virheet ovat yleensä arvottomimman eli III-laatuluokan kohdalla. Ko. laatua on puussa tavallisesti eniten, joten kokonaistilavuuden ja tukki-tilavuuden virheet vaikuttavat siihen eniten. Lisäksi malleja käytettäessä on otettava huomioon, että III-laadun sekä alkamis- että päättymiskohdan määräävät mallit eli tyvipuolella kuivaoksarajamalli ja latvapuolella latvusrajamalli.

Tutkimuksessa rungon tukkiosuuden jako eri laatuluokkiin perustui pelkästään puun läpimittoihin ja oksarajoihin. Laskelmissa ulkopuolelle jäivät siis monet laatuluokkien osuuteen vaikuttavat tekijät, kuten lenkous ja halkeamat sekä sallitut maksimipaksuudet eri oksatyypeille. Saatuja tuloksia tarkasteltaessa on pidettävä myös mielessä, että käytetty apteerausalgoritmi ei ota huomioon yksittäisten poikkeavien oksien mahdollista vaikutusta laatuajakaumaan (esim. kuolleet oksat tuoreoksa-alueella). Oksatunnusten käyttöä kuvioittaisessa arvioinnissa kuitenkin puoltaa se, että ne ovat helposti mitattavia tunnuksia verrattuna muihin laatua kuvaaviin tunnuksiin.

Tässä tutkimuksessa oksarajat mitattiin koealan keskipuusta, sillä se on helppo määrittää maastossa relaskooppimittausten yhteydessä. On kuitenkin pohdittava, onko keskipuuta paras mahdollinen vaihtoehto oksarajojen määrittämiseen ja ovatko lisämittaukset esim. koealan pienimmästä ja suurimmasta puusta tarpeen. Tämän tutkimuksen aineistojen perusteella keskipuun oksarajatunnukset kuvaavat varsin hyvin koko metsikön keskimääräistä puuston laatua. Jos ei ole käytössä luotettavia oksarajamalleja, kannattaa käyttää suoraan yhtä mitattua oksarajaa koko metsikölle (varsinkin, jos I-laatuluokka on merkitsevin kriteeri).

VAPU-koealoilta saatua tuloksia tulkittaessa on

otettava huomioon lisäksi muutamat tuloksiin vaikuttaneet tekijät. Aineiston kehitys- ja ikäluokkien osuudet eivät olleet tutkimuksen kannalta parhaita mahdollisia (ks. taulukko 1). Lisäksi koealat eivät olleet jakautuneet tasaisesti Suomen alueelle, vaan maan eteläosista oli suhteellisesti enemmän koealoja kuin muualta maasta.

Saatujen tulosten perusteella voi kuitenkin tehdä suuntaa-antavia päätelmiä erilaisten mittaustelmien käytöstä ja tehokkuudesta kuvioittaisessa metsänarvioinnissa, kun halutaan ottaa laatu- ja kasvukohdat huomioon. Kuten oli odotettua lisämittaukset parantavat tuloksia. Kuvioittaisessa arvioinnissa on otettava huomioon rajalliset resurssit, joten malleja joudutaan siis käyttämään. Erityisesti tarvitaan lisää tietoa kuivaoksarajan korkeuteen vaikuttavista tekijöistä. Mallien vaatimat alkutiedot pitäisi olla helposti, halvalla ja luotettavasti mitattavia metsikkö- tai puustotunnuksia.

Yksityismetsätalouden metsäsuunnitelmien suosiossa on havaittu viime aikoina laskeva trendi. Metsänomistajat ovat yhä vähemmän kiinnostuneita hankkimaan suunnitelmaa, joka monen mielestä on vaikeaselkoinen ja eikä palvele tehokkaasti käyttäjänsä (Halla 1996). Yksi mahdollisuus parantaa suunnitelmia on saatavan tukkimäärän jakaminen laatuluokkiin. Tätä kautta puukauppatilanteessa on metsänomistajan helpompi valita sopivat myyntikohteet ja toisaalta ostaja tietää paremmin etukäteen minkälaisesta (laatusesta) leimikosta on kyse ja voi sitä kautta suunnitella tehokkaammin hankintaansa. Tukkiisuuden jakaminen laatuluokkiin ei yksistään ole riittävä ratkaisu, sillä laatuvaatimukset ja oksarajat muuttuvat suunnitteluajanjakson kuluessa. Tällöin olisi järkevää liittää suunnitelmaan lasketun ja eri laatuluokkiin eritellen tukkimäärän lisäksi tiedot suunnitteluajankohdan oksarajoista ja mahdollisista muista laatu- ja kasvutunnuksista, joita käyttämällä voitaisiin laskea uutta tilannetta (ajankohtaa) vastaavat tunnuksat.

## Kiitokset

Puiden apteerauksessa käytetty dynaamiseen optimointiin perustuva apteerausalgoritmi/-ohjelma ja

Mekrijärven aineisto on saatu MMM Janna Puumalaiselta. Jaamankankaan aineiston keruussa avusti MMM Tatu Torniainen. Käsikirjoituksen luki MMM Tapio Räsänen Metsätehosta. Kaksi käsikirjoituksen tarkastajaa teki lukuisia hyödyllisiä korjausesityksiä. Tutkimus on osa 'Metsätiedon hankinta, ylläpito ja seuranta metsätalouden suunnittelua varten' -hanketta, jota on rahoittanut maa- ja metsätalousministeriö. Kaikille edellä mainituille henkilöille ja tutkimuksen rahoittajalle haluamme lausua kiitokset.

## Kirjallisuus

- Ahonen, O.-P. & Mäkelä, H. 1995. Etelä-Suomen raaka-puuvarat laskennalliseen pölkytykseen perustuen. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1995(3): 165–178.
- Bellman, R.E. 1957. *Dynamic programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ. 340 s.
- Goulding, C. J., Deadman, M.W. & Lawrence, M.E. 1993. Assessing stem qualities and using dynamic programming to predict log-product volumes in inventory. *Julkaisussa: Proceedings of Ilvessalo Symposium on national forest inventories. Organized by IUFRO S4.02. Finland, August 17–21, 1992. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 444: 171–178.
- Halla, T. 1996. Metsäsuunnitelmat käyvät heikosti kau-paksi. *Maaseudun Tulevaisuus* 1.10.1996. s. 9.
- Heikinheimo, O. 1953. Puun rungon luontaisesta karsiu-tumisesta. Summary: On natural pruning of tree stems. *Communicationes Institutii Forestalis Fenniae* 41(5). 39 s.
- Heiskanen, V. 1954. Tutkimuksia mäntytukkipuiden laatuluokitustavoista ja niiden tarkkuudesta. Summary: Investigations into pine tree grading methods and their accuracy. *Communicationes Institutii Forestalis Fenniae* 44(1). 132 s.
- 1965. Puiden paksuuden ja nuoruuden kehityksen sekä oksaisuuden ja sahapuulaadun välisistä suhteista män-niköissä. Summary: On the relations between the de-velopment of the early age and thickness of trees and their branchiness in pine stands. *Acta Forestalia Fen-nica* 80(2). 62 s.
- 1984. Sahatukkiin laatumaksutavasta ja laatuluoki-tuksesta. *Sahamies* 6: 146–150.
- 1988. Mäntytukkiin laatuluokitus, laadunvalvonta ja laatumaksutapa. *Sahamies* 8: 234–237.
- Hynynen, J. 1995. Predicting tree crown ratio for un-thinned and thinned Scots pine stands. *Canadian Jour-nal of Forest Research* 25: 57–62.
- Jauhiainen, H. 1996. Naapurin tukeilla väljemmät laa-dut. *Metsälehti* 16 b, 12.9.1996. s. 34.
- Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1986. Kasvatustiheyden ja kasvupaikan viljavuuden vaikutus puiden oksik-kuuteen taimikko- ja riukuvaiheen männiköissä. Sum-mary: Effect of stand density and site fertility to the branchiness of Scots pines at pole stage. *Communi-cationes Institutii Forestalis Fenniae* 139. 38 s.
- Kilkki, P. 1983. Sample trees in timber volume estima-tion. *Acta Forestalia Fennica* 182. 35 s.
- Koivunen, J. 1989. Männyn ja koivun kuivien ja elävien oksien alkamiskorkeuden ennustaminen. *Metsänar-vioimistieteen pro gradu -tutkielma maatalous-met-sätieteiden kandidaatin tutkintoa varten. Helsingin yli-opisto*. 44 s.
- Korhonen, K. 1991. Sekamallitekniikalla laadittujen run-kokäyrämallien käyttö metsäinventoinnissa. Sum-mary: Using taper curve models based on mixed li-near models in forest inventory. *Folia Forestalia* 774. 27 s.
- & Maltamo, M. 1990. Männyn maanpäällisten osien kuivamassat Etelä-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitok-sen tiedonantoja* 371. 14 s.
- Kuusela, K. 1966. A basal area-mean tree method in forest inventory. *Communicationes Institutii Foresta-lis Fenniae* 61. 32 s.
- Kärkkäinen, M. 1980. Mäntytukkirunkojen laatuluokitus. Summary: Grading of pine sawlog stems. *Communi-cationes Institutii Forestalis Fenniae* 96(5). 152 s.
- 1985. Puutiede. Arvi A. Kariston kirjapaino, Hämeen-linna. 415 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communi-cationes Institutii Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Laatumaksutapa – hyödyksi vai haitaksi? 1985. *Saha-mies* 1: 12–17.
- Lappi, J. 1991. Calibration of height and volume equa-tions with random parameters. *Forest Science* 37(3): 781–801.
- 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Lemmetty, J. & Mäkelä, M. 1992. Suunnittelumittauk-sen perusteet ja toteutus. Summary: Method for me-asurement of a stand for harvest planning. *Metsäte-hon katsaus* 11/1992. 4 s.
- Loetsch, F., Zöhrer, F. & Haller, K.E. 1973. *Forest in-ventory. Volume II. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München*. 469 s.

- Mykkänen, R. 1986. Weibull-funktion käyttö puuston läpimittajakauman estimoinnissa. Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 80 s.
- Mäkinen, H. & Uusvaara, O. 1993. Lannoituksen vaikutus männyn oksikkuuteen ja puuaineen laatuun. Summary: Effect of fertilization on the branchiness and wood quality of Scots pine. *Folia Forestalia* 801. 23 s.
- Nyysönen, A. & Ojansuu, R. 1982. Metsikön puutavaralajirakenteen, arvon ja arvokasvun arviointi. Summary: Assessment of timber assortments, value and value increment of tree stands. *Acta Forestalia Fennica* 179. 52 s.
- Näsberg, M. 1985. Mathematical programming models for optimal log bucking. Linköping Studies in Science and Technology, Dissertation No. 132. Department of Mathematics, Linköping University. 174 s.
- PMP-ohje. 1982. PMP-systeemin hoitokunta.
- Puumalainen, J. 1997. Optimal cross-cutting and sensitivity analysis for various log dimension constraints by using dynamic programming approach. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Painossa.
- Päivinen, R. 1983. Metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmä. Summary: A method for estimating the saw-log percentage in Scots pine and Norway spruce stands. *Folia Forestalia* 564. 16 s.
- 1987. Metsän inventoinnin suunnittelumalli. Summary: A planning model for forest inventory. Joensuun yliopiston luonnontieteellisiä julkaisuja – University of Joensuu, Publications in Sciences 11. 179 s.
- Searle, S. R. 1987. Linear models for unbalanced data. John Wiley & Sons, New York. 536 s.
- SOLMU maastotyöopas. 1996. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 80 s.
- Turkia, K. & Kellomäki, S. 1987. Kasvupaikan viljavuuden ja puuston tiheyden vaikutus nuorten mäntyjen oksien läpimittaan. *Folia Forestalia* 705. 16 s.
- Uusitalo, J. 1994. Sahatavaran laadun ennustaminen mäntytukkirungosta. Summary: Predicting lumber quality of pine stems. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, Publications 3. 53 s.
- 1995. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, Publications 9. 96 s.
- & Kivinen, V.-P. 1994. Leimikon ennakkomittauksen ajanmenekki. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1994(2): 123–139.
- Uusvaara, O. 1974. Wood quality in plantation-grown Scots pine. Lyhennelmä: Puun laadusta viljelymänniköissä. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 80(2). 105 s.
- Varmola, M. 1982. Taimikko ja riukuvaiheen männikön kehitys harvennuksen jälkeen. Summary: Development of Scots pine stands at the sapling and pole stages after thinning. *Folia Forestalia* 524. 27 s.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmalli männylle, kuuselle ja koivulle. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma maatalous-metsätieteiden kandidaatin tutkintoa varten. Helsingin yliopisto. 59 s.
- Vuokila, Y. 1982. Metsien teknisen laadun kehittäminen. Summary: The improvement of technical quality of forests. *Folia Forestalia* 523. 55 s.
- Vähäsaari, H. 1988. Puutavaralajirakenteen arvioiminen eri mittausmenetelmillä. Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto. 96 s.
- Yksinkertaistettu mäntytukin laatumaksutapa. 1985. *Sahamies* 5: 112–114.

#### 45 viitettä