

Matti Maltamo, Arto Haara, Hannu Hirvelä, Annika Kangas, Reetta Lempinen, Juha Malinen, Aki Nalli, Tuula Nuutinen ja Jouni Siipilehto

Läpimittajakaumamalleihin perustuvat vaihtoehdot kuvauspuiden muodostamiseen puuston keskitunnustietojen avulla

Maltamo, M., Haara, A., Hirvelä, H., Kangas, A., Lempinen, R., Malinen, J., Nalli, A., Nuutinen, T. & Siipilehto, J. 2002. Läpimittajakaumamalleihin perustuvat vaihtoehdot kuvauspuiden muodostamiseen puuston keskitunnustietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 407–423.

Tutkimuksessa testattiin ja vertailtiin erilaisia läpimittajakaumamalleja kuvauspuiden muodostamisessa kuvioittaisen arvioinnin laskentajärjestelmässä. Tutkimuksen aineistona käytettiin Valtakunnan metsien inventoinnin kiinteäsäteisiä pysyviä koealoja. Vertailut menetelmät olivat runkoluvullinen ja runkoluvuton prosenttiosuusmalli, vastaavat Johnsonin S_B -jakauman parametrimallit sekä runkoluvuttomat Weibullin parametrimallit. Kaikki mallit kuvaavat pohjapinta-alan läpimittajakaumia, mutta runkoluvullisissa malleissa käytetään selittäjänä myös puusto-ositteen runkolukua. Puulajeista tarkasteltiin niin mäntyä, kuusta, koivuja kuin myös haapaa ja leppää. Tuotettujen puustotunnusestimaattien (kokonais- ja tukkitilavuus sekä runkoluku), tarkkuutta tarkasteltiin keskivirheen ja harhan avulla.

Mikäli runkoluku oli tiedossa, tuotti runkoluvullinen prosenttiosuusmalli yleensä tarkimmat tulokset niin tilavuuden kuin runkoluvunkin osalta. Tilavuusestimaattien osalta tarkkuuserot olivat kuitenkin pieniä. Jos taas runkolukua ei tiedetty, olivat vertailut menetelmät keskimäärin likimain yhtä hyviä. Menetelmien keskinäinen tarkkuusjärjestys vaihteli puulajin, puuston koon ja tarkastellun puustotunnuksen suhteen. Käytettävän läpimittajakaumamallin valintaa tärkeämpää on kiinnittää huomiota maastossa mitattavan puustotiedon määrään ja etenkin laatuun.

Asiasanat: kuvioittainen arviointi, läpimittajakauma, Johnsonin S_B -jakauma, prosenttiosuusmenetelmä, Weibull-jakauma

Yhteystiedot: *Maltamo*, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu; *Haara, Lempinen* ja *Nuutinen*, Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu; *Hirvelä*, Metla, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki; *Kangas*, Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto; *Malinen* ja *Nalli*, TietoEnator Oyj, Niitymäentie 7, 02200 Espoo; *Siipilehto*, Metla, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa

Sähköposti Matti.Maltamo@forest.joensuu.fi

Hyväksytty 5.9.2002

I Johdanto

Kuvioittainen arviointi on Suomessa yleisesti käytetty menetelmä metsävaratietojen hankintaan. Esimerkiksi yksityismetsien alueellinen suunnittelu kattaa n. 72 % yksityismetsien pinta-alasta ja vuosittain suunnitellaan vajaa 1 000 000 hehtaaria (Oksanen-Peltola 1999).

Kerättyjä tietoja hyödynnetään sekä metsävaratietojen laskennassa että puuston kehitysennusteiden laadinnassa (Nalli ja Hyttinen 1992). Kuvioittaisessa arvioinnissa kerätään metsikkökuvioon ja sen puustoon liittyviä tietoja. Metsikkökuvioon liittyviä tunnuksia ovat tyypillisesti kasvupaikkaa ja kuvion käsittelyhistoriaa kuvaavat tiedot. Puustotiedot kerätään nykyisin lähes poikkeuksetta puusto-ositteiden keskitunnuksina (Solmu... 1996). Puusto-ositteet muodostetaan maastoinventoinnin yhteydessä puulajin ja puujakson perusteella.

Puuston kehityksen ennustamisessa voidaan käyttää joko metsikkökohtaisia tai puukohtaisia malleja. Metsikkökohtaisia malleja käytettäessä puuston kasvu voidaan yleensä ennustaa suoraan kuvioittaisessa arvioinnissa kerättyjen kuvio- ja puustotietojen avulla. Metsikkökohtainen tieto voidaan kuitenkin myös palauttaa puutasolle läpimittajakaumamallien avulla niin laskennan lähtö- kuin lopputilanteessakin (esim. Mabvurira ym. 2002).

Yksittäisten puiden käyttö laskennassa on perusteltua, kun halutaan yksityiskohtaisempaa tietoa esim. metsikkökuvion puuston rakenteesta (Hynynen 1996) ja puutavaralajijakaumasta (Uusitalo 1995). Kun puuston kehityksen ennustaminen perustuu puukohtaisiin malleihin, metsänkäsittelyn vaikutuksesta puuston ja puutavaralajijakauman kehitykseen voidaan saada parempi kuva kuin metsikkökohtaisia malleja käytettäessä. Puukohtaisia malleja käytetään esimerkiksi metsätalouden suunnittelussa laajasti käytössä olevassa MELA-ohjelmistossa, johon on koottu metsien kehitystä ja käsittelyä kuvaavia malleja (Siitonen ym. 1996, Hynynen ym. 2002).

Yksittäisiin puihin perustuvia malleja käytettäessä puusto-ositteiden keskitunnusten avulla ennustetaan kuvauspuut laskennan lähtötiedoiksi. Yksittäisiin puihin perustuvan laskennan lähtöaineiston tuottaminen perustuu tällöin puuston kokojakaumaan ja

puustotunnusten välisiä relaatioita kuvaavien mallien käyttöön (esim. Kilkki ja Siitonen 1975).

Suomessa hyödynnetään kokojakaumina ns. pohjapinta-alan läpimittajakaumia, jolloin teoreettinen relaskooppiotannalla kerättyyn aineistoon tai puita on jakauman estimoinnissa painotettu pohjapinta-alallaan. Läpimittajakaumia kuvaavia erilaisia malleja onkin Suomessa esitetty runsaasti viimeisen 20 vuoden aikana eri puulajeille (Päivinen 1980, Kilkki ja Päivinen 1986, Mykkänen 1986, Siipilehto 1988, Kilkki ym. 1989, Maltamo ym. 1995, Maltamo 1997, Maltamo ja Kangas 1998, Siipilehto 1999 ja Kangas ja Maltamo 2000a ja b, Kärki ym. 2000) sekä myös erilaisiin erityisolosuhteisiin (esim. Hökkä ym. 1991, Maltamo ym. 2000). Siipilehto (1999) sekä Kangas ja Maltamo (2000c) ovat myös testanneet ja vertailleet eri jakaumamalleja esimerkiksi aineiston maantieteellisen sijainnin sekä maapohjan ja puuston käsittelyhistorian suhteen vaihtelevissa olosuhteissa. Läpimittajakaumamalleja on tarkasteltu myös erilaisissa kokoomateoksissa viime vuosina runsaasti (esim. Maltamo 1998, Malinen ym. 1999, Maltamo 2001, Maltamo ja Laukkanen 2001).

Suomalaiset läpimittajakaumasovellukset ovat perinteisesti parametrimalleja, joissa Weibull tai betajakauman parametreja on ennustettu metsikön keskitunnuksilla, lähinnä keskiläpimitalla, pohjapinta-alalla ja puuston iällä (esim. Kilkki ja Päivinen 1986). Koska metsikkötunnukset eivät selitä kovin hyvin jakauman muotoa vaan lähinnä sijaintia, puuston kokojakauman kuvaus on voimakkaasti keskiarvoistunut eli ennustetut jakaumat ovat likimain samanmuotoisia kaikissa metsiköissä. Lisäksi pohjapinta-alajakauman käyttö toisaalta parantaa jakauman avulla laskettavan puuston tilavuusestimaatin tarkkuutta mutta toisaalta puuston rakennetta kuvaava runkoluku kuvautuu epätarkasti.

Viimeaikaisissa suomalaisissa läpimittajakaumatutkimuksissa on nimenomaan keskitytty näihin edellä mainittuihin ongelmiin. Maltamo ja Kangas (1998) sovelsivat ei-parametrista k:n lähimmän naapurin menetelmää, jossa puuston kokojakauma ennustettiin aineistotietokannasta haettujen aikaisemmin mitattujen referenssimetsiköiden kokojakaumien avulla kohdemetsikön ja referenssimetsiköiden keskitunnusten yhtäläisyyden perusteella. Siipilehto (1999) käytti puolestaan runkolukua ylimääräisenä

selittäjänä Johnsonin S_B -jakauman parametrimalleissa. Tällöin pystyttiin puuston runkoluku ennustamaan huomattavasti tarkemmin, vaikka käytettiin pohjapinta-alan läpimittajakaumia. Maltamo ym. (2000) ja Kangas ja Maltamo (2000b) puolestaan sovelsivat Bordersin ym. (1987) kehittämää prosenttiosuusmenetelmää puujoukon kuvaamisessa. Kyseinen menetelmä kuuluu ns. jakaumamuodoista vapaisiin menetelmiin, joilla pystytään kuvaamaan myös erittäin heterogeenisiä jakaumia. Edelleen Kangas ja Maltamo (2000a,c, 2002) ovat esittäneet menetelmiä ennustetun jakauman kalibroimiseksi mitatulla lisäinformaatiolla, kuten esimerkiksi runkoluvulla tai läpimittajakauman ääriarvoilla. Käytetyn menetelmän, kalibrointiestimoinnin (Deville ja Särndal 1992), avulla ennustettua jakaumaa voidaan muotoilla esimerkiksi siten, että se toteuttaa niin mitatun pohjapinta-alan kuin runkoluvunkin.

Läpimittajakaumamallien lisäksi olennainen osa kuvauspuiden muodostamisessa on puiden pituuskien tuottaminen. Suomessa on yleisesti käytetty Veltheimin (1987) laatimia puulajikohtaisia valtakunnallisia yhtälöitä, joissa puun pituutta selittää läpimitan lisäksi joukko kasvupaikkaa ja puustoa kuvaavia metsikkökohtaisia tunnuksia. Toinen vaihtoehto pituuden ennustamiseksi on käyttää metsikkökohtaisia pituuskäyriä kuten Näslundin pituusmallia. Tällöin voidaan mallin parametreja ennustaa keskitunnuksilla vastaavasti kuin läpimittajakaumamallien tapauksessa (Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2002). Edelleen läpimita- ja pituusjakauman yhdenaikainen kuvaaminen on mahdollista kaksiulotteisilla jakaumilla (esim. Siipilehto 2000).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kuvauspuiden muodostamista ja edelleen puustotunnusten laskentaa läpimittajakaumamallien perusteella. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti testaamaan ja arvioimaan viime aikoina esitettyjä vaihtoehtoisia menetelmiä runkolukusarjan ennustamiseksi. Käytetyt läpimittajakaumamallit ovat Weibull ja Johnsonin S_B -jakauman parametrimallit sekä prosenttiosuusmenetelmä.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Testausaineisto

Kuvauspuiden muodostamista testattiin koko maan kattavalla valtakunnan metsien pysyvien koealojen kolmannen mittauskerran aineistolla, joka on kerätty vuonna 1995 (Pysyvien koealojen...1995). Aineisto valittiin maantieteellisen kattavuuden vuoksi. Siipilehdon (1999) ja Kankaan ja Maltamon (2000c) läpimittajakaumatestauksissa käyttämien aineistojen lisäksi kyseessä on ainut maantieteellisesti laaja tutkimusaineisto Suomessa. Lisäksi aineiston etuna on kiinteäsäteinen koealamuoto.

VMI:n pysyvät koealat on sijoitettu systemaattisella otannalla (Valtakunnan... 1986). Koealoilta on kuviokohtaisina muuttujina mitattu joukko kasvupaikkaa ja puustoa kuvaavia tunnuksia. Mitattavat lukupuut on yksilöity ympyräkoealoilta, joiden koko on 3 aaria yli 10 cm paksuille puille ja 1 aari sitä pienemmille puille. Kaikista lukupuista on mitattu puulaji ja läpimitta. Koepuukoealan muodosti puolestaan ympyrä, jonka säde on puolet vastaavan kokoisen puun lukupuukoealan säteestä. Koepuista on lukupuutunnusten lisäksi mitattu mm. puun pituus ja ikä.

Aineistosta hyväksyttiin testaukseen koealat, jotka osuivat yhdelle metsä- tai kitumaan metsikkökuvioille. Usealle metsikkökuvioille osuneet koealat hylättiin, koska niiden ei katsottu kuvaavan riittävän hyvin metsikkökuvion puustoa.

Koealasta muodostettiin puulajikohtainen puusto-osite, jos siltä oli mitattu vähintään 10 mäntyä, kuusta tai koivua. Lepän ja haavan tapauksessa minimiotoskooksi riitti 6 puuta. Lisäksi kunkin tarkasteluun otetun puusto-ositteen pohjapinta-alan oli oltava vähintään $1 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ ja pohjapinta-alamediaanipuun keskiläpimitan vähintään 5 cm. Koealoista 67,4 % sattui kivennäismaille ja loput 32,6 % turvemaille. Metsätyypijakaumaltaan koealoista sijoittui n. 20 % lehdolle ja lehtomaisille kankaille, reilut 40 % mustikkatyypille ja vajaat 30 % puolukkatyypille. Loput eli n. 10 % koealoista oli puolestaan puolukkatyypin karummilla kasvupaikoilla. Ainoastaan 53 koealaa eli 3,4 % koko aineistosta oli metsiköissä, jotka olivat metsänkäyttörajoitusten tai erilaisten suojeluohjelmien piirissä. Puusto-ositteiden keskitunnukset ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Puusto-ositteiden keskitunnukset. Käytetyt muuttujat: d_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta, h_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun pituus, PPA = pohjapinta-ala, RL = runkoluku, Ikä = puuston ikä, V = kokonaistilavuus, V_{tukki} = tukkitilavuus, n = mitattujen puiden lukumäärä.

		Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä
d_{gM}	minimi	5,0	6,0	5,0	5,0
	maksimi	37,0	53,0	39,0	31,0
	keskiarvo	15,7	19,4	12,2	11,9
	keskihajonta	5,7	7,2	4,8	4,9
h_{gM}	minimi	2,4	6,0	6,5	6,4
	maksimi	24,7	34,3	26,3	20,7
	keskiarvo	12,4	16,0	12,4	12,2
	keskihajonta	4,2	4,7	3,4	3,2
PPA	minimi	2,5	3,5	2,0	1,4
	maksimi	41,4	47,6	32,3	36,2
	keskiarvo	12,7	16,2	8,3	6,3
	keskihajonta	6,2	8,2	4,9	5,1
RL	minimi	333	333	333	200
	maksimi	3235	3402	3569	2368
	keskiarvo	975	944	1002	793
	keskihajonta	522	503	451	424
Ikä	minimi	8,0	15,0	14,0	10,0
	maksimi	275,0	170,0	209,0	73,0
	keskiarvo	58,0	66,3	46,4	34,6
	keskihajonta	30,9	25,4	19,3	12,0
V	minimi	8,1	12,6	7,3	4,9
	maksimi	411,1	505,4	328,2	291,4
	keskiarvo	85,4	130,6	52,2	39,2
	keskihajonta	60,8	87,7	42,1	41,0
V_{tukki}	minimi	0,0	0,0	0,0	0,0
	maksimi	294,7	452,1	157,6	45,7
	keskiarvo	27,0	67,7	4,8	1,5
	keskihajonta	44,4	74,2	14,5	5,8
n	minimi	10	10	10	6
	maksimi	56	62	57	38
	keskiarvo	18,8	18,7	15,7	12,2
	keskihajonta	8,3	8,1	6,8	6,6

Koska VMI-aineistossa alle 4,5 cm paksuista puista vain osasta on mitattu läpimitta ja osasta arvioitu vain kokonaislukumäärä, tässä tutkimuksessa tarkasteltiin empiiristä runkolukusarjaa pääsääntöisesti vain yli 4,5 cm paksujen puiden osalta. Luotettavuustunnukset laskettiin kuitenkin myös puujoukoille, joissa em. pienetkin puut oli otettu huomioon. Lisäksi tarkasteltiin erikseen aineistoa, jossa oli mukana keskipituudeltaan ainoastaan yli

10 metriä pitkät puusto-ositteet. Tähän päädyttiin siksi, että osa käytetyistä kokojakaumamalleista oli laadittu nimenmaan tällaisesta aineistosta. Tällöin aineistoon kuului 541 männyn, 518 kuusen, 211 koivun ja yhteensä 76 lepän ja haavan puusto-ositetta

2.2 Kuvauspuiden muodostamismenetelmä

Kuvauspuiden tuottamisessa käytettiin MELA-ohjelmistoa (Redsven ym. 2002). Tällöin puujoukon muodostamisen vaiheita ovat puusto-ositteen läpimitta- tai pituusjakauman, kuvauspuiden pituuden tai läpimitan ja kuvauspuiden biologisen ja rinnankorkeusiän ennustaminen. Jos kuvio- tai puusto-ositetiedot ovat puutteelliset kuvauspuiden muodostamisessa tai laskennan lähtöaineistossa tarvittavien muuttujien osalta, niitä voidaan täydentää mallien tai päätteily sääntöjen avulla. Tässä yhteydessä oletetaan kuitenkin kaikki tarvittavat puuston keskitunnukset mitatuiksi.

MELAssa puusto-osite kuvataan joko läpimita- tai pituusjakaumalla puuston koosta riippuen. Läpimittajakaumaa käytetään, kun puusto-ositteen keskiläpimitta on vähintään 5 cm. Läpimittajakauma voidaan muodostaa joko mitatun tai ennustetun pohjapinta-alan suhteen ja pituusjakauma vastaavasti mitatun tai ennustetun runkoluvun suhteen. Tässä tutkimuksessa käsiteltiin kuitenkin ainoastaan läpimittajakauman ennustamista käyttämällä mitattua pohjapinta-alaa.

Läpimittajakauman ennustamisessa käytetään todennäköisyysjakaumiin tai prosenttiosuusmenetelmään perustuvia läpimittajakaumamalleja. Todennäköisyysjakaumia on kaksi: Weibull- tai Johnsonin S_B -funktiot. Weibull-funktion parametrit ennustetaan kuuselle Kilkin ym. (1989) ja muille puulajeille Mykkäsen (1986) malleilla, joiden selittävinä muuttujina ovat puusto-ositteen keskiläpimitta ja pohjapinta-ala. Weibull-jakauman parametrimalien laadinta-aineistona on käytetty Valtakunnan metsien kahdeksannen inventoinnin relaskooppikoealoja, joissa mitatun puuston määrä on hyvin suppea. Ennustetun Weibull-jakauman kertymäfunktiosta poimitaan kuvauspuut halutuissa läpimittaluokissa. Johnsonin S_B -jakaumaa sovelletaan vastaavasti, mutta kertymäfunktion sijasta hyödynnetään tiheysfunktiota. Johnsonin

S_B-jakauman parametrimallit on laadittu erikseen männylle, kuuselle ja koivulle (Siipilehto 1999). Koivun malleja käytetään myös muille lehtipuille. Kyseiset mallit on laadittu metsikkökoela-aineistosta, joka sisältää keskipituudeltaan ainoastaan yli 10 metriä pitkiä varttuneita sekametsiä.

Prosenttiosuusmenetelmä poikkeaa todennäköisyysfunktioista siten, että menetelmässä ennustetaan läpimittoja pohjapinta-alan kertymäpisteissä 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 ja 100 %. Ääripisteet vastaavat puuston minimi- ja maksimiläpimittaa ja 50 % kertymä pohjapinta-alamediaanipuun läpimittaa, joka oletetaan mitatuksi. Ennustetut läpimittapisteet yhdistetään Späthin rationaalisella splinifunktiolla (Lether 1984) jatkuvaksi jakaumaksi. Prosenttipistemallit on laadittu erikseen männylle, kuuselle ja koivulle käyttämällä kuvioittaisen arvioinnin tarkistusinventointiaineistoa, joka perustuu relaskooppiotantaan (Kangas ja Maltamo 2000b). Koivun malleja käytetään myös muille lehtipuille.

Sekä Johnsonin S_B-jakaumamalleista että prosenttiosuusmenetelmän malleista on laadittu runkoluvulliset ja runkoluvuttomat muodot. Runkoluvuttomissa malleissa selittäjinä käytetään puusto-ositteen keskiläpimittaa sekä -pituutta, pohjapinta-alaa, ikää ja kasvupaikan hyvyttä kuvaavia tunnuksia. Runkoluvullisissa malleissa on näiden lisäksi selittäjinä myöskin runkoluku, joka on suhteutettu puuston pohjapinta-alaan.

Kuvauspuiden pituudet ennustetaan puulajeittain Veltheimin (1987) malleilla. Pituusmalli kalibroidaan korjauskertoimen avulla. Muodostettujen kuvauspuiden biologisena ja rinnankorkeusikänä käytetään puusto-ositteen mitattua tai ennustettua keski-ikää. Tässä tutkimuksessa kalibrointikerroin laskettiin VMI-koealojen pituuskoepuumittausten perusteella. Vastaavasti laskettiin myös puusto-ositteen keski-ikä.

2.3 Testausjärjestely

Myös kuvauspuiden muodostamisen testauksessa hyödynnettiin MELA-ohjelmistoa (Redsven ym. 2002). Jokaiselta puusto-ositteelta muodostettiin kaksi aineistoa, puukohtainen ja ositteen keskitunnukset sisältävä (kuva 1). Mitatuista puista muo-

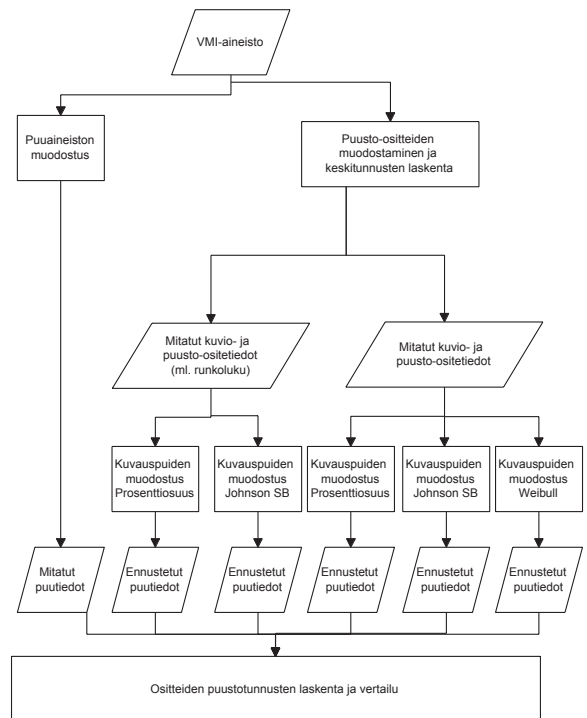
dostetun puukohtaisen aineiston avulla laskettiin metsikkökuvioiden ositteiden todelliset puustotunnukset. Puun edustama runkoluku laskettiin aineistoon seuraavasti:

$$rl_{puu} = \frac{10000}{A} \quad (1)$$

rl_{puu} = puun edustama runkoluku, r/ha
 A = koealan pinta-ala, m²

Puusto-ositteiden keskitunnukset määritettiin pohjapinta-alamediaanipuun tunnuksista ja tiheystunnukset yleistettiin hehtaarikohtaisiksi koealan koon perusteella (kaava 1).

Testausta varten kuvauspuut muodostettiin edellä esitetyillä menetelmillä. Puustotunnusten laskennassa käytettiin ositekohtaisesti kymmentä kuvauspuuta. Tällöin ennustettu puujoukko jaettiin pohjapinta-alan suhteen kymmeneen yhtä suureen osaan (0–10 %, 10–20 %, ..., 90–100 %) ja luokkaa vastaava läpimitta poimittiin pohjapinta-alaluokan keskeltä (d(5%), d(15%), ..., d(95%)).



Kuva 1. Testausjärjestely.

Puu- ja keskitunnusaineistosta laskettuina ositteiden puustotunnuksina käytettiin kokonaistilavuutta, puiden dimensioiden mukaista tukkitilavuutta sekä runkolukua. Näitä puustotunnuksia verrattiin keskenään ja vertailun avulla arvioitiin kuvauspuiden muodostamismenetelmien hyvyttä. Puiden tilavuustunnukset laskettiin kaikissa tapauksissa Laasanenahon (1982) tilavuus- ja runkokäyrämalleilla.

Testattavien tunnusten harha ja keskivirhe (RMSE) laskettiin seuraavasti:

$$\text{Harha} = \sum_{i=1}^N \frac{(k_i - \hat{k}_i)}{N} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(k_i - \hat{k}_i)^2}{N-1}} \quad (3)$$

k_i = tunnuksen k todellinen arvo puusto-ositteessa i

\hat{k}_i = tunnuksen k ennustettu arvo puusto-ositteessa i

N = puusto-ositteiden lukumäärä.

Suhteellinen harha ja RMSE laskettiin eri tunnuksille jakamalla absoluuttinen harha ja RMSE ennustettujen tunnusten arvojen keskiarvolla.

3 Tulokset

Kuvauspuiden muodostamismenetelmiä arvioitiin ensiksi niiden tuottamien puustotunnusestimaattien tarkkuuden perusteella koko aineistossa. Tarkasteltaessa kokonaistilavuuksia keskivirheen avulla voidaan havaita, että mitä enemmän informaatiota oli käytettävissä sitä tarkempia olivat tulokset (taulukko 2). Männyn ja kuusen puusto-ositteiden sekä metsikön kokonaistilavuuden kohdalla tarkimmat tulokset saatiin runkoluvullisella prosenttiosuusmallilla, kun taas lehtipuiden tapauksessa myös Johnsonin S_B -jakauman runkoluvullinen versio oli jokseenkin yhtä hyvä. Kaikkein huonoimmat tulokset saatiin puolestaan Weibull-jakaumalla. Toisaalta erot eri menetelmien välillä olivat hyvin pienet.

Lähes poikkeuksetta kaikki menetelmät tuottivat yliarvioita kokonaistilavuudesta (taulukko 3). Isoimmat yliarviot havaittiin Weibull-jakaumalla sekä runkoluvullisella prosenttiosuusmallilla. Johnsonin S_B -jakaumat olivat kuusta lukuun ottamatta hyvin harhattomia.

Tukkitilavuuden osalta tulokset olivat hyvin saman suuntaisia kuin kokonaistilavuudenkin osalta

Taulukko 2. Suhteelliset (%) kokonaistilavuuden keskivirheet puulajeittain eri läpimittajakaumamalleilla (suluissa absoluuttiset keskivirheet m^3ha^{-1}). Menetelmien lyhenteet: Weibull= Weibull-jakauma; PROS, rl = runkoluvullinen prosenttiosuusmalli; PROS, ei rl = runkoluvuton prosenttiosuusmalli; SB, rl = runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma; SB, ei rl = runkoluvuton Johnsonin S_B -jakauma.

Menetelmä	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä	Metsikkö
Weibull	3,49 (3,01)	6,35 (8,56)	4,94 (2,60)	4,89 (1,96)	5,39 (5,89)
PROS, rl	2,39 (2,06)	3,38 (4,48)	3,96 (2,10)	3,47 (1,40)	3,08 (3,34)
PROS, ei rl	3,23 (2,76)	5,17 (6,76)	4,48 (2,35)	3,70 (1,48)	4,42 (4,75)
SB, rl	2,73 (2,34)	5,00 (6,62)	4,20 (2,19)	3,52 (1,39)	4,53 (4,21)
SB, ei rl	3,12 (2,68)	5,56 (7,37)	4,69 (2,47)	4,38 (1,75)	4,71 (5,08)

Taulukko 3. Suhteelliset (%) kokonaistilavuuden harhat puulajeittain eri läpimittajakaumamalleilla (suluissa absoluuttiset harhat m^3ha^{-1}). Käytetyt lyhenteet ks. Taulukko 2.

Menetelmä	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä	Metsikkö
Weibull	-1,06 (-0,91)	-3,16 (-4,26)	-0,83 (-0,44)	-1,18 (-0,47)	-2,04 (-2,23)
PROS, rl	-1,08 (-0,93)	-1,60 (-2,12)	-1,47 (-0,78)	-2,00 (-0,81)	-1,38 (-1,50)
PROS, ei rl	-0,28 (-0,24)	-0,27 (-0,36)	-0,39 (-0,21)	-0,95 (-0,38)	-0,30 (-0,32)
SB, rl	-0,14 (-0,12)	-1,39 (-1,83)	0,29 (0,15)	0,04 (0,01)	-0,69 (-0,74)
SB, ei rl	-0,47 (-0,40)	-1,45 (-1,92)	-0,66 (-0,35)	-0,95 (-0,38)	-0,96 (-1,04)

(taulukko 4). Vastaavasti tarkasteltaessa kokonaistilavuuden osalta puusto-ositteita, joiden keskipituus oli yli 10 metriä, saatiin samansuuntaisia tuloksia kuin koko aineistossa puuston kokonaistilavuuden keskivirheen osalta. Kaikkien menetelmien kohdalla tilavuuden suhteelliset keskivirheet kuitenkin pienivät hieman.

Eri menetelmien välillä oli havaittavissa selkeitä eroja tarkkuudessa, kun tarkasteltiin runkoluvun keskivirhettä ja harhaa (taulukot 5 ja 6). Männyn ja kuusen osalta ainoastaan runkoluvullinen prosenttiosuusmalli tuotti alle 10 % keskivirheitä, kun taas muiden menetelmien keskivirheet olivat välillä 20–40 %. Runkoluvuttomista malleista tarkimmat tuloksen tuotti kuusta lukuun ottamatta Weibull-jakauma.

Runkoluvun harhojen osalta Weibull-jakauma tuotti selkeitä aliarvioita, mikä on raportoitu jo

aikaisemmissakin tutkimuksissa (Siipilehto 1999). Vastaavasti runkoluvuton prosenttiosuusmenetelmä ja Johnsonin S_B -jakaumamallit tuottivat yliarvioita, joista suurimmat havaittiin runkoluvuttoman prosenttiosuusmenetelmän kohdalla. Runkoluvullisen prosenttiosuusmenetelmän tuottamat estimaatit olivat lieviä yliarvioita havupuilla ja aliarvioita lehtipuilla (taulukko 6).

Kun runkoluvun virheitä tarkasteltiin keskipituu-deltaan vain yli 10 metriä suuremmissa metsiköissä olivat tulokset keskivirheen osalta runkoluvullisilla malleilla jokseenkin vastaavia kuin koko aineistosakin. Runkoluvuttomien mallien osalla taas Johnsonin S_B -jakauman ja prosenttiosuusmenetelmän virheet pienivät, kun taas Weibull-jakauman tuottamat virheet kasvoivat. Männyn kohdalla Johnsonin S_B -jakauman tarkkuuden paraneminen oli jopa yli 10 %-yksikköä.

Taulukko 4. Suhteelliset (%) tukkitilavuuden keskivirheet puulajeittain eri läpimittajakaumamalleilla (suluissa absoluuttiset keskivirheet m^3ha^{-1}). Käytetyt lyhenteet ks. Taulukko 2.

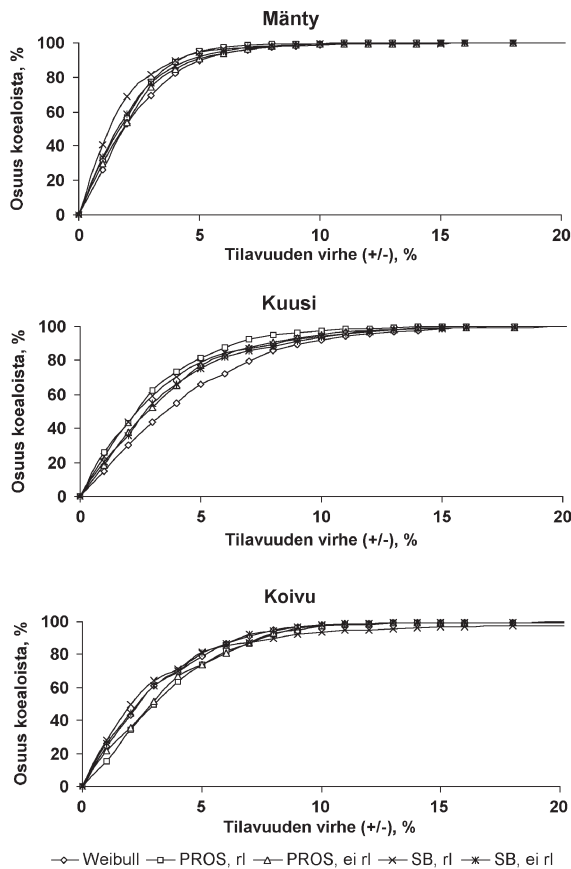
Menetelmä	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä	Metsikkö
Weibull	23,55 (5,84)	20,09 (14,30)	95,13 (4,45)	127,90 (2,00)	24,04 (10,20)
PROS, rl	17,42 (4,88)	13,63 (9,31)	65,72 (4,25)	106,45 (1,91)	16,74 (7,07)
PROS, ei rl	22,95 (6,29)	19,29 (12,78)	75,03 (4,88)	107,86 (1,82)	22,85 (9,39)
SB, rl	19,99 (5,38)	18,26 (12,45)	73,34 (3,67)	122,72 (1,89)	21,29 (8,79)
SB, ei rl	22,57 (6,28)	20,05 (13,70)	89,99 (4,43)	136,21 (1,89)	23,54 (9,84)

Taulukko 5. Suhteelliset (%) runkoluvun keskivirheet puulajeittain eri läpimittajakaumamalleilla (suluissa absoluuttiset keskivirheet $kpl ha^{-1}$). Käytetyt lyhenteet ks. Taulukko 2.

Menetelmä	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä	Metsikkö
Weibull	22,52 (203,41)	40,35 (309,18)	24,75 (236,17)	27,06 (207,81)	27,37 (271,55)
PROS, rl	5,25 (50,93)	6,16 (56,89)	10,68 (111,71)	11,88 (100,04)	6,66 (73,83)
PROS, ei rl	32,40 (377,42)	28,67 (303,05)	30,81 (390,58)	32,80 (333,18)	30,05 (395,01)
SB, rl	23,23 (265,41)	23,86 (238,96)	8,87 (92,42)	12,98 (107,13)	20,54 (252,08)
SB, ei rl	35,18 (385,76)	36,91 (359,99)	25,93(269,28)	29,34 (250,09)	32,12 (385,59)

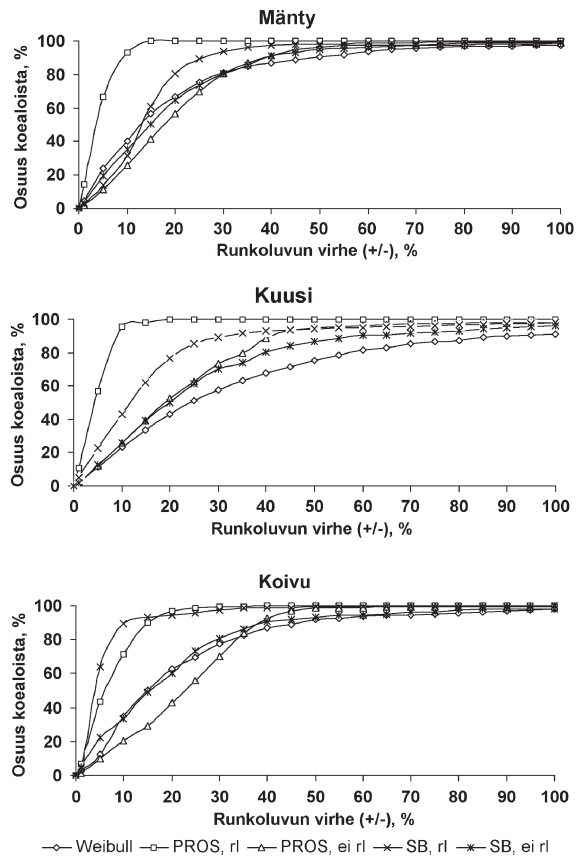
Taulukko 6. Suhteelliset (%) runkoluvun harhat puulajeittain eri läpimittajakaumamalleilla (suluissa absoluuttiset harhat $kpl ha^{-1}$). Käytetyt lyhenteet ks. Taulukko 2.

Menetelmä	Mänty	Kuusi	Koivu	Haapa ja leppä	Metsikkö
Weibull	8,01 (72,33)	23,21 (177,88)	5,01 (47,85)	4,11 (31,60)	11,81 (117,15)
PROS, rl	0,57 (5,55)	2,29 (21,14)	-4,22 (-44,19)	-4,93 (-41,55)	0,01 (0,12)
PROS, ei rl	-16,26 (-189,38)	-10,67 (-112,71)	-20,96 (-265,68)	-21,11 (-214,48)	-15,62 (-205,25)
SB, rl	-14,64 (-167,25)	-5,72 (-57,25)	-3,82 (-39,79)	-2,92 (-24,09)	-9,61 (-117,97)
SB, ei rl	-11,05 (-121,15)	-3,19 (-31,08)	-3,49 (-36,29)	-6,14 (-52,34)	-7,12 (-85,01)



Kuva 2. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeitaisten tilavuuksien koealakohtaisten virheiden jakautuminen koealojen kertymän mukaan. Vertailtujen menetelmien lyhenteet: Weibull = Weibull-jakauma; PROS, rl = runkoluvullinen prosenttiosuusmalli; PROS, ei rl = runkoluvuton prosenttiosuusmalli; SB, rl = runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma; SB, ei rl = runkoluvuton Johnsonin S_B -jakauma.

Jos alkuperäisessä puujoukossa otettiin huomioon myös alle 4,5 cm paksut puut nousivat runkolukues-timaattien keskivirheet huomattavasti. Esimerkiksi männyn kohdalla Weibull-jakauman keskivirhe nousi 53,2 %:iin, runkoluvuttoman prosenttiosuusmallin virhe 37,6 %:iin, runkoluvullisen Johnsonin S_B -jakauman virhe 49,7 %:iin ja runkoluvuttoman Johnsonin S_B -jakauman virhe 46,4 %:iin. Ainoastaan runkoluvullinen prosenttiosuusmalli pystyi ottamaan huomioon myös pienten puiden aiheut-taman lisäyksen runkolukuun oikeassa suhteessa,

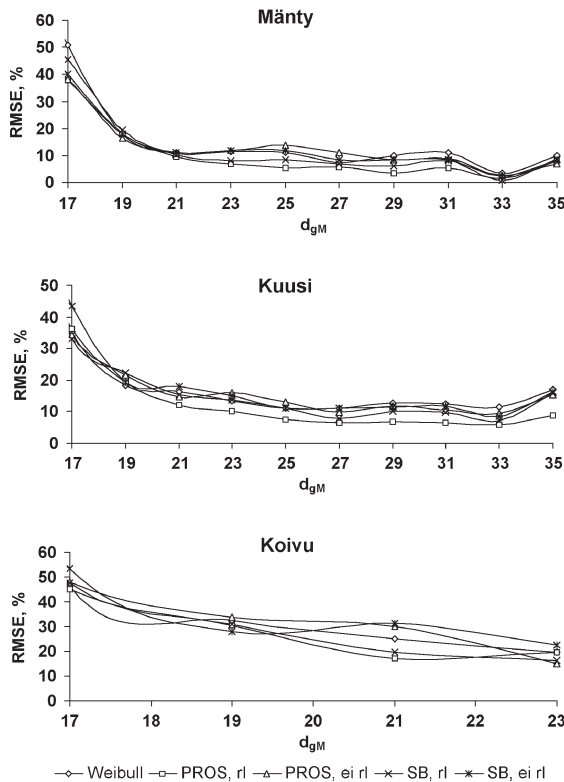


Kuva 3. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeitaisten runkolukujen koealakohtaisten virheiden jakautuminen koealojen kertymän mukaan. Käytetyt lyhenteet ks. kuva 2.

sillä menetelmän tuottama runkoluvun keskivirhe oli ainoastaan 5,4 %. Sen sijaan runkoluvullinen S_B -jakauma yliarvioi runkoluvun lisäyksen männyn ja kuusen malleilla. Pienten puiden mukaan ottaminen ei toisaalta vaikuttanut tilavuustunnusten keskivir-heisiin juuri ollenkaan, mikä olikin odotettavissa.

Seuraavaksi eri menetelmiä verrattiin tarkaste-lemalla koealakohtaisia tilavuuden ja runkoluvun virheitä (kuvat 2 ja 3). Tämä toteutettiin laskemal-la niiden koealojen osuus, joissa virhe oli enintään annetulla tasolla. Näissä tarkasteluissa käsiteltiin puulajeista mäntyä, kuusta ja koivua.

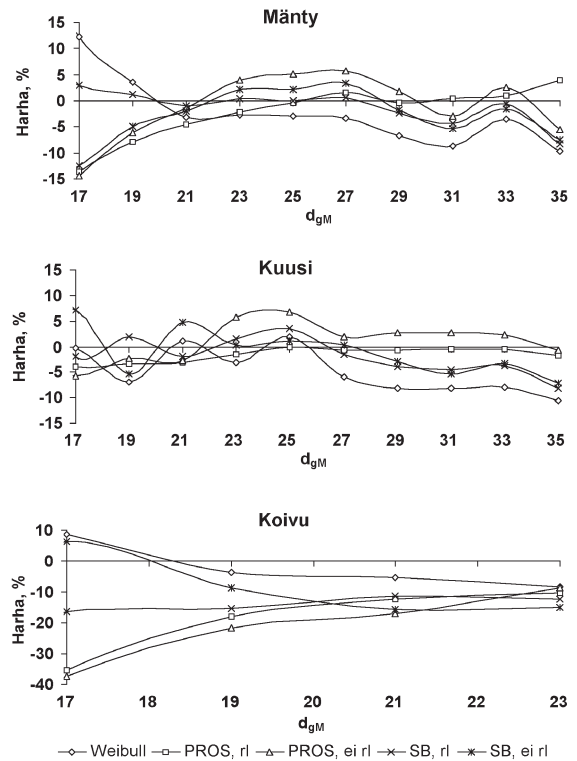
Tilavuuden osalta eri menetelmien väliset puu-lajeittaiset erot olivat vähäisiä, mikä oli odotetta-



Kuva 4. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeittaisten tukkitilavuuksien keskivirheet keskiläpimittaluokittain. Käytetyt lyhenteet ks. kuva 2.

vissa myös keskivirheiden tarkastelun perusteella (kuva 2). Kuusen kohdalla Weibull-jakauma tosin tuotti hieman muita menetelmiä huonompia tuloksia ja männyn kohdalla runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma hieman muita tarkempia tuloksia suurimmalla osalla koealoista. Kaikilla tarkastelluilla menetelmillä virhe oli alle 10 % suurimmalla osalla koealoista.

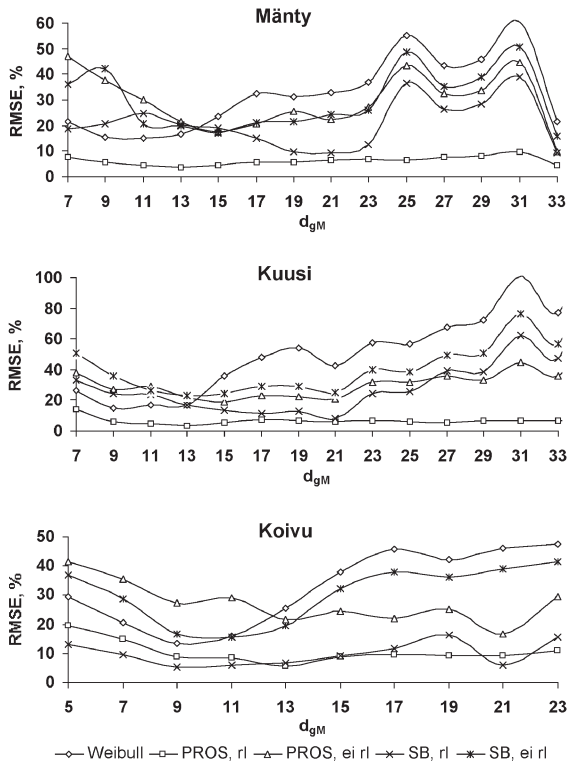
Runkoluvun osalta kuvauspuiden eri muodostusmenetelmien erot olivat varsin selkeät (kuva 3). Runkoluvullinen prosenttiosuusmenetelmä (PROS, ri) tuotti männyn ja kuusen osalta selvästi parhaimmat tulokset, kun taas koivun kohdalla n. 80 % koealoista kuvautui tarkimmin runkoluvullisella Johnsonin S_B -jakaumalla (SB, ri). Vastaavasti suurin osa koealoista kuvautui runkoluvun suhteen huonimmin runkoluvuttomalla prosenttiosuusmallilla (PROS, ei rl) männyn ja koivun ositteissa, kun taas



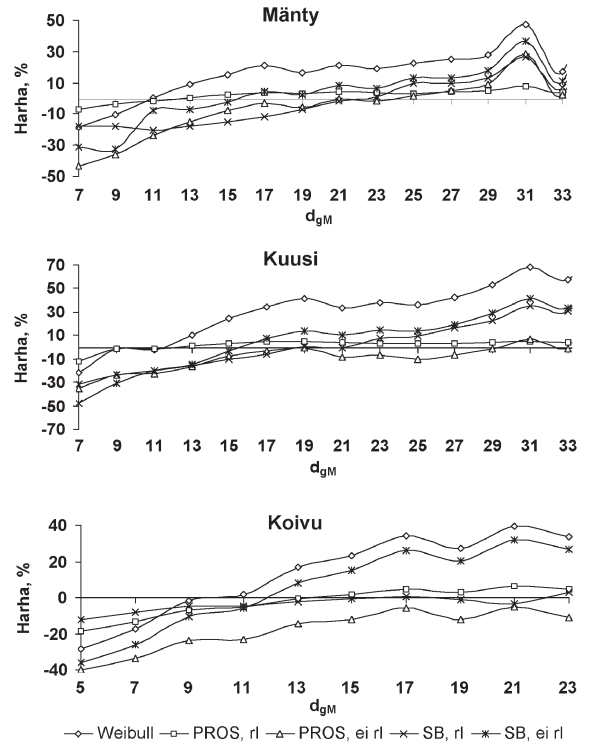
Kuva 5. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeittaisten tukkitilavuuksien harhat keskiläpimittaluokittain. Käytetyt lyhenteet ks. kuva 2.

kuusen tapauksessa Weibull-jakauma oli selkeästi epätarkin menetelmä. Jos runkoluku ei ole tiedossa, vaikuttaa Johnsonin S_B -jakauma (SB, ei rl) näiden tarkastelujen perusteella keskimääräisesti parhaimmalta vaihtoehdolta puuston rakenteen kuvautumisen suhteen. Erityisesti männyn ja koivun kohdalla Johnsonin S_B -jakauma oli tarkin vaihtoehto suurimmalla osalla koealoista. Tämä oli nähtävissä myös tarkasteltaessa keskipituudeltaan vain yli 10 metriä suurempien metsiköiden runkoluvun virheitä.

Lopuksi puujoukon muodostusmenetelmiä tarkasteltiin keskiläpimittaluokittain tukkitilavuuden ja runkoluvun suhteen. Tukkitilavuuden osalta erot keskivirheessä eri menetelmien välillä olivat pienet, joskin runkoluvullinen prosenttiosuusmenetelmä osoittautui yleensä tarkimmaksi vaihtoehdoksi kaikkien puulajien kohdalla (kuva 4). Suhteelliset virheet kasvoivat yleensä keskiläpimitaltaan alle



Kuva 6. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeittaisten runkolukujen keskivirheet keskiläpimittaluokittain. Käytetyt lyhenteet ks. kuva 2.



Kuva 7. Eri läpimittajakaumamalleilla ennustettujen puulajeittaisten runkolukujen harhat keskiläpimittaluokittain. Käytetyt lyhenteet ks. kuva 2.

20 cm metsiköissä, mikä johtuu tukkitilavuuden osuuden vähenemisestä kyseisissä metsissä.

Koivun tukkitilavuudessa oli huomattavissa selkeä yliarviointi kaikilla menetelmillä (kuva 5). Havupuiden kohdalla menetelmien tarkkuus vaihteli keskiläpimittaluokittain suuresti. Runkoluvullinen prosenttiosuusmenetelmä tuotti suurimmissa keskiläpimittaluokissa ($d_{gM} > 23$) harhattomia tuloksia, mutta pienemmissä luokissa menetelmän käyttö johti aliarvioihin.

Runkoluvun kohdalla läpimittaluokittaiset keskivirheet olivat yleensä pienimpiä runkoluvullisen prosenttiosuusmallin tapauksessa (kuva 6). Suurimmat virheet havaittiin puolestaan Weibull-jakauman tapauksessa, kun puusto-ositteen keskiläpimitta oli yli n. 13 cm. Keskiläpimitaltaan sitä pienemmissä metsiköissä runkoluvuton prosenttiosuusmalli puolestaan tuotti vertailluista menetelmistä yleensä suurimmat virheet männyn ja koivun kohdalla

ja runkoluvuton Johnsonin S_B -jakauma taas kuusen kohdalla. Verrattaessa runkoluvuttomia Johnsonin S_B -jakaumaa ja prosenttiosuusmallia keskenään voidaan havaita, että koivun kohdalla suuremmissa puustoissa prosenttiosuusmenetelmä on tarkempi ja pienemmissä taas Johnsonin S_B -jakauma. Kuusen kohdalla runkoluvuton prosenttiosuusmenetelmä on yleensä aina tarkempi ja männyn kohdalla näiden menetelmien erot eri läpimittaluokissa ovat hyvin pieniä. Kaikkien menetelmien kohdalla keskiläpimittaluokittain virheet olivat kuusen tapauksessa keskenään lähes yhtäsuuria, kun tarkasteltiin alle 20 cm keskiläpimittaluokkia. Muiden puulajien tapauksessa vaihtelu oli suurempaa, mutta keskivirhe oli kuitenkin pienimmillään yleensä puusto-ositteen keskiläpimittaluokissa välillä 10–20 cm.

Tarkasteltaessa runkoluvuestimaattien harhaa olivat ennusteet yleensä yliarvioita pienemmissä luokissa ja aliarvioita suuremmissa keskiläpimittaluokissa

siten, että suurimmat aliarviot havaittiin Weibull-jakauman kohdalla (kuva 7). Vastaavasti suurimmat yliarviot tuotti yleensä runkoluvuton prosenttiosuusmenetelmä. Saatuihin tuloksiin vaikutti kuitenkin se, että alkuperäiset puujoukot oli katkaistu 4,5 cm:n kohdalta.

4 Tarkastelu

4.1 Saadut tulokset ja niiden vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

Tässä tutkimuksessa testattiin ja vertailtiin erilaisia läpimittajakaumamalleja kuvauspuiden muodostamisessa. Tuotettujen puustotunnusten tarkkuutta tarkasteltiin niin tilavuusestimaattien kuin myös puuston rakenteen kuvautumisen kannalta. Mikäli runkoluku oli tiedossa, tuotti runkoluvullinen prosenttiosuusmalli selvästi tarkimmat tulokset. Jos taas runkolukua ei tiedetty, olivat tulokset jossain määrin ristiriitaisia eri kriteerien suhteen. Tilavuuden suhteen olivat prosenttiosuusmalli ja Johnsonin S_B -jakauma yleensä aina Weibullia tarkempia, mutta runkoluvun osalta Weibull osoittautui pienissä puustoissa tarkimmaksi vaihtoehdoksi. Verrattaessa Johnsonin S_B -jakaumaa ja prosenttiosuusmenetelmää keskenään oli prosenttiosuusmenetelmä kuusen kohdalla tarkempi. Muiden puulajien tapauksessa oli prosenttiosuusmenetelmä useammin tilavuuden suhteen hieman tarkempi, mutta runkoluvun osalla taas Johnsonin S_B -jakauma oli tarkempi, etenkin jos tarkasteltiin keskipituudeltaan yli 10 metriä pitkiä metsiköitä.

Saatuja tuloksia voidaan suuntaa-antavasti verrata aikaisempiin tutkimuksiin, joissa on verrattu läpimittajakaumamalleja keskenään (Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2000c). Eri tutkimuksissa on kuitenkin selkeitä eroja keskenään esimerkiksi sen suhteen, miten aineisto on rajattu, kuinka puiden pituus on otettu huomioon tai miten luotettavuustunnukset laskettu. Aikaisemmissa tutkimuksissa on myös jaoteltu aineistoa mm. maantieteellisesti ja maapohjan perusteella, mitä ei tässä yhteydessä tehty.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat kuitenkin hyvin samansuuntaisia kuin mitä aiemminkin on

havaittu. Suurimpana erona voidaan pitää sitä, että runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma ei pystynyt kuvaamaan puuston rakennetta runkoluvun suhteen yhtä tarkasti kuin Siipilehdon (1999) tutkimuksessa. Erityisesti tarkkuuden huononeminen koski havupuita, kun taas lehtipuiden kohdalla tarkkuus oli lähes yhtä hyvä kuin aiemminkin. Osa tarkkuuden huononemisesta selittynee nyt käytetyn aineiston istutusmetsiköistä, joita Siipilehdon (1999) käyttämä mallitusaineisto ei sisältänyt. Lisäksi havaintoaineiston katkaiseminen saattoi lisätä runkoluvun yliarviota, koska S_B -jakauma oli ainut jakauma, jonka tiheysfunktio lähti nolasta. Tarkkuus ei myöskään juurikaan parantunut, vaikka tarkasteltiin mallien laadinta-aineiston mukaisesti keskipituudeltaan ainoastaan yli 10 metriä pitkiä varttuneita puustoja.

Vastaavasti Weibull-jakauma osoittautui runkoluvun suhteen paremmaksi vaihtoehdoksi kuin mitä Siipilehdon (1999) tutkimuksessa todettiin. Tämä selittyy osittain sillä, että Siipilehto (1999) tarkasteli keskipituudeltaan vain yli 10 metriä pitkiä metsiköitä, joiden kohdalla Weibull-jakauman tarkkuus oli huono myös tässä tutkimuksessa (esim. kuva 6). Lisäksi tässä tutkimuksessa havaittiin, että Weibullin tuottamat läpimittajakauman alarajat olivat yleensä suurempia kuin muilla malleilla.

Eri menetelmiä verrattiin käyttämällä kriteerinä tuotettujen puustotunnusten tarkkuutta. Vaihtoehdoisesti olisi voitu hyödyntää perinteisiä jakaumatestejä kuten esimerkiksi χ^2 -testiä. Tällaisten testien soveltaminen painotetuissa aineistoissa on kuitenkin ongelmallista. Vastaavasti, jos olisi laskettu muita koelakohtaisia indeksejä alkuperäisen ja ennustetun jakauman eroista, olisi niiden yleistäminen läpi aineiston ollut vaikeaa.

Laskennassa käytetyn MELA-ohjelmiston takia muodostetun läpimittaluokittaisen jakauman informaatio tiivistettiin kymmeneen kuvauspuuhun. Tämä on periaatteessa voinut vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Toisaalta tätä tutkimusta laadittaessa tehtiin myös laskelmia, joissa käytettiin 1 cm:n läpimittaluokitusta eikä saaduissa tuloksissa ollut merkittäviä eroja verrattuna nyt havaittuihin.

4.2 Vertailut mallit ja niiden laadinta-aineistot

Tässä tutkimuksessa käsitellyistä läpimittajakaumamalleista prosenttiosuusmenetelmä toimi yleensä erinomaisesti, kun puusto-ositteen runkoluku oli tiedossa. Mallit vaikuttivat erittäin joustavilta ja pystyivät ottamaan huomioon myös eri tavoin määritetyn runkoluvun. Sen sijaan runkoluvuttomien prosenttiosuusmallien toiminnassa oli parantamisen varaa. Voidaankin todeta, että pohjapinta-alan suhteen mallitettu prosenttiosuusmalli on jakauman alkupään osalta jopa liian joustava menetelmä. Jos runkolukua ei ole mitattu, läpimittaluokittaisiksi frekvensseiksi palautettu jakauma kuvautuu hyvin usein laskevaksi jakaumaksi, mikä ei kivennäismaila kasvavilla talousmetsillä ole realistista puuston rakenteen kuvauksen kannalta.

Prosenttiosuusmallit on laadittu kuvioittaisen arvioinnin tarkistusaineistosta (Anttila ym. 2001), mikä ei välttämättä ole paras mahdollinen vaihtoehto läpimittajakaumamalleille. Vaikka otoksen muodostaakin yleensä riittävän suuri määrä havaintoja, on otanta silti tehty relaskoopilla. Tällöin runkoluvun varianssi läpimittaluokassa on sitä suurempi, mitä pienempi on läpimittaluokka.

Johnsonin S_B -jakaumamallit on laadittu muihin vertailtuihin menetelmiin nähden erilaisesta aineistosta. Sekä prosenttiosuusmallit että Weibull-jakauman parametrimallit on laadittu inventointiperusteisista aineistosta, jotka sisältävät hyvin erilaisia metsiköitä. Johnsonin S_B -jakaumamallit on puolestaan laadittu näyteperusteisesti valituista varttuneista kivennäismaiden luontaisesti syntyneistä sekametsistä, jotka ovat sekä maantieteellisen sijainnin suhteen että myöskin keskitunnusten vaihteluvälin kannalta varsin suppeita. Toisaalta näissä aineistoissa metsikkökohtainen puusto-otos on kuitenkin erittäin edustava (Mielikäinen 1980, 1985). Täytyy siis muistaa, että tässä tutkimuksessa Johnsonin S_B -malleja sovellettiin laadinta-aineistonsa ulkopuolelle niin maapohjan, syntyvän kuin myös puuston keskitunnusten suhteen. Tämä ei tosin näyttänyt juurikaan heikentävän tuloksia muuten kuin runkoluvun suhteen.

Weibull-jakauman parametrimalleista on myös sovelluksia, jotka on laadittu joko kuvioittaisen arvioinnin tarkistusaineistoista tai kiinteäsäteisiltä

koaloilta (Maltamo 1997, Siipilehto 1999). Aikaisemmissa tutkimuksissa nämä mallit ovat osoittautuneet huomattavasti kilpailukykyisemmiksi (Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2000c), joskaan Weibull-jakauma ei Siipilehdon (1999) mukaan pysty hyödyntämään runkolukuinformaatiota yhtä tehokkaasti kuin esimerkiksi perusominaisuksiltaanakin huomattavasti joustavampi Johnsonin S_B -jakauma.

4.3 Otoksoon merkitys

Tutkimuksessa hyödynnetty Valtakunnan metsien inventoinnin pysyvien koealojen tutkimusaineisto oli maantieteellisesti laaja-alainen kattaen systemaattisesti koko Suomen. Aineisto oli kerätty 1990-luvun puolivälissä, joten se on mitattu 5–20 vuotta myöhemmin kuin mitä eri mallien laadinta-aineistot. Tällä aikavälillä tapahtuneet muutokset metsien rakenteessa ovat myös saattaneet vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Aineistossa on niin turve- kuin kivennäismaille sattuneita koealoja kuten myös talousmetsiä ja luonnontilaisia puustoja. Koska koealojen sijoittelu on systemaattista, on luonnontilaisten metsiköiden osuus kuitenkin sangen vähäinen. Toisaalta Lappiin ja Itä-Suomeen sattuneilla talousmetsäkoaloilla on luultavasti havaittavissa jossain määrin luonnontilaisten metsien rakenteen piirteitä.

Tutkimusaineiston koealamuoto oli kiinteä, jolloin puuston rakenteen kuvaus ei ollut (koealakohtaisesti) vääristynyt painotuksen takia kuten on laita esimerkiksi relaskoopiotannalla kerätyissä aineistoissa. Aineistossa pienet puut ($d < 10$ cm) oli kuitenkin mitattu pienemmältä koealalta kuin suuret. Lisäksi täytyy muistaa, että aineiston koealakoko on kuitenkin varsin pieni, jolloin puustosta kertynyt otos sisältää metsikkötasolla runsaasti otosvirhettä eikä useissa tapauksissa kuvanne puustoa metsikkötasolla luotettavasti.

Pienehkö koealakoko ja siitä johtuva vähäinen otos metsikön puustosta on luultavasti vaikuttanut erityisesti Johnsonin S_B -jakauman kykyyn tuottaa alkuperäiseen otokseen rinnastuvia runkolukuestimaatteja. Siipilehdon (1999) esittämissä Johnsonin S_B -jakauman runkoluvullisissa parametrimalleissa pääasiallinen selittäjä on niin sanottu G-suhde, joka

lasketaan jakamalla puusto-ositteen kokonaispohjapinta-ala runkoluvun ja mediaanipuun pohjapinta-alan tulolla. Ilmeisesti kyseinen muuttuja on erittäin herkkä puustotunnusten keskinäisille relaatioille. Mikäli puusto-otos, jonka perusteella tunnus lasketaan, ei ole riittävän edustava, voi tämä aiheuttaa ongelmia mallien käytännön soveltamisessa.

Vaikka riittävä koealakoko onkin ehdoton edellytys läpimittajakaumamallien luotettavalle laadinnalle niin otoksen edustavuuden kuin mallin estimoinnin kannalta, ei sama päde yhtä tiukasti laadittujen mallien testaukselle. Mallien testaaminen aineistoissa, joissa otos puustosta on hyvin suuri, kertoo yksinkertaisesti sen, kuinka hyvin mallit toimivat todellisilla ja realistisilla keskitunnuksilla sovellettuina erilaisissa olosuhteissa. Toisin sanoen tutkitaan sitä, kuinka suuri on mallivirheen vaikutus ja voidaanko malleja kenties soveltaa laadinta-aineistonsa ulkopuolella luotettavasti. Tällaisissa tutkimuksissa on puuston tilavuuden suhteelliseksi keskivirheeksi yleensä saatu verrattain pieniä lukuja väliltä 1–10 % riippuen siitä onko myös pituusmallin virhe otettu huomioon (esim. Maltamo ja Kangas 1998, Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2002). Myös tässä tutkimuksessa saadut tilavuuden keskivirheet olivat edellä mainitulla välillä, vaikka pieniltä koealoilta saatujen jakaumien muodossa väistämättä on enemmän vaihtelua kuin suurista otoksista lasketuissa. Pääasiallinen syy pienille virheille on virheettömän pohjapinta-alan käyttö jakauman skaalauksessa.

Metsätaloudessa läpimittajakaumamalleja sovelletaan kuvioittaisen arvioinnin mukaisissa inventointitilanteissa, joissa metsästä mitattu keskitunnustieto on yleensä hyvin vähäistä ja usein jopa pelkästään silmävaraisesti arvioitua. Mikäli käytännön mittaustilanteissa olisi mahdollista mitata puustosta edustava otos, ei läpimittajakaumamalleja edes tarvittaisi. Kuvioittaisen arvioinnin tilavuuden keskivirheeksi on saatu huomattavan suuria lukuja väliltä 15–40 % (esim. Poso 1983, Laasasenaho ja Päivinen 1986, Pussinen 1992). Tällöin mallivirheen lisäksi mukana ovat myös mittaus- ja otosvirheiden vaikutukset.

Kuvioittaisen arvioinnin ja kuvauspuiden muodostuksen virheet eivät aina vaikuta samaan suuntaan. Tulosten luotettavuus voi myös muuttua tarkasteltavan alueen koon mukaan, ts. kuviotasol-

la tilavuuden virhe voi olla suuri, mutta tilatasolla virheet kumoavat toisiaan. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta tulisikin optimitilanteessa tarkastella maastoinventoinnin ja käytettävien mallien virheiden kokonaisuutena.

4.4 Runkoluvun käyttö

Otoskoon lisäksi tutkimusaineistojen ja käytännön soveltamisen toinen keskeinen ongelma on puusto-ositteen runkoluvun määrittäminen ja hyödyntäminen. Pohjapinta-alajakaumien käytön takia ei runkoluvun realistinen kuvautuminen jakaumaennusteissa ole alunperinkään taattua. Läpimittajakaumamallien tuottamissa ennusteissa suurimmat runkolukuvirheet ja -ongelmat on yleensä havaittu nuorissa metsissä. Koska tässä tutkimuksessa tarkasteltiin suhteellisia keskivirheitä, eivät nuorten metsien runkolukuestimaattien virheet erottuneet vanhemmista metsistä. Mikäli olisi käytetty absoluuttisia arvoja, olisi tilanne ollut toisenlainen.

Runkolukuestimaattien ongelmallisuus korostuu edelleen käytettäessä relaskooppiotantaa, jolloin alle 10 cm paksut puut kuvautuvat jo alkuperäisessä otoksessa (koealakohtaisesti) epätarkasti (Vuokila 1959). Tämä on vastaavasti nähtävissä relaskooppiotanta-aineistoon perustuvien läpimittajakaumamallien tuottamissa runkolukuestimaateissa, jotka ovat useimmiten selkeitä aliarvioita. Tässä tutkimuksessa tällaisia läpimittajakaumamalleja edustivat Suomessa yleisesti hyödynnetyt Weibull-jakauman parametrimallit (Mykkänen 1986, Kilkki ym. 1989).

Runkolukuun liittyvä ongelma on myös pienimpien puiden huomioonottaminen. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa käytetyssä VMI-aineistossa osa alle 4,5 cm paksuista puista oli mitattu ja osa jätetty mitaamatta. Tämä aiheuttaa erittäin suurta vaihtelua niin mitattuihin kuin ennustettuihinkin puujoukkoihin ja niinpä tässä tutkimuksessa tarkasteltiin pääsääntöisesti vain yli 4,5 cm paksuja puita. Kun pienimmät puut otettiin mukaan runkolukusarjaan, nosti se huomattavasti läpimittajakaumamallien tuottamia runkolukuestimaattien keskivirheitä. Metsikön pienimmät puut voivat varttuneissa puustoissa olla vailla merkitystä, mutta jos puuston keskiläpimitta on alle 10 cm, muodostavat nämä puut huomattavan osan runkolukusarjasta. Lisäk-

si kun pieniä puita on paljon, voi niillä olla oma merkityksensä metsikön uudistamisen tai toisaalta harvennuskustannusten kannalta. Toisin sanoen, jos pienillä puilla on merkitystä, ne pitäisi voida kuvata jakaumamalleilla.

Mitattavan ja käsiteltävän puujoukon rajausten pienten puiden osalta kaipaakin lisäselvitystä. Metsätalouden käytännön organisaatioiden taholta onkin esitetty, että tutkimuksen pitäisi tuottaa yksiselitteistä tietoa runkoluvun rajaamisperiaatteista. Toisaalta ei ole kuitenkaan edes olemassa riittävän laajoja tutkimusaineistoja, jonka perusteella pienimpien puiden runkolukua erityyppisillä määrittelyillä ja määrittelyjen vaikutusta puustotunnusten ennustamiseen voisi selvittää.

Kaiken kaikkiaan niin runkoluvun mittaaminen, käyttö mallien selittäjänä kuin myös kalibrointi-muuttujana on hyvin ongelmallista muuttujan määrittelyn sekä suuren mittausvirheen takia. Kankaan ym. (2002) tutkimuksen perusteella runkoluvun arviointivirhe käytännön mittaustilanteessa oli jopa 80 %. Mittaajilla ei kuitenkaan ollut koulutusta runkoluvun mittaamiseksi tutkimusaineiston kaltaisissa nuorissa kasvatusmetsissä ja sitä varttuneemmissa puustoissa. Samassa tutkimuksessa pohjapinta-alan mittausvirheen suuruus oli 31,8 % ja keskipuun läpimitan sekä pituuden virheet n. 20 ja 15 %.

4.5 Kuvioittaiseen arviointiin liittyvät jatkotutkimukset

Läpimittajakaumamallien jatkotutkimusten kannalta olennaisimpia asioita on mahdollisten uusien mallien laadinta parhaimmista mahdollisista aineistoista. Havupuiden osalta tämä tarkoittaa Metsätutkimuslaitoksen kivennäismaiden kestokoealojen (INKA) (Gustavsen ym. 1988) hyödyntämistä täydennettynä vastaavilla turvemaiden kestokoealoilla (SINKA) (Penttilä ja Honkanen 1986). Rauduskoivun osalta Siipilehdon (1999) käyttämää aineistoa tulisi täydentää istutuskoivikoilla. Sopivia hieskoivu-aineistoja löytyy SINKA-kokeista sekä muista mahdollisista erityisaineistoista (esim. Verkasalo 1997). Myös taimikot olisivat mahdollisuuksien mukaan otettava samanaikaisesti jakaumamallin- nuksen piiriin. TINKA-aineistojen (Gustavsen ym. 1988) lisäksi olisi hyödynnettävä muita mahdollisia

taimikonhoitokokeita.

Tässä tutkimuksessa vertailtujen läpimittajakaumamallien lisäksi myös ei-parametriset sovellukset voisivat olla hyvin kilpailukykyisiä kuvauspuiden muodostamismenetelmiä (esim. Maltamo ja Kangas 1998). Koska kyseiset menetelmät edellyttävät aina referenssiaineiston olemassaoloa, on niiden hyödyntämisessä MELA-ympäristössä kuitenkin omat ongelmansa. Lisäksi optimaalisen referenssiaineiston valinta ei välttämättä aina ole helppoa. Ei-parametristen menetelmien, erityisesti kanonisiin korrelaatioihin perustuvan MSN-menetelmän (esim. Malinen ym. 2001), etuna on kuitenkin se, että vaikka esimerkiksi runkolukua ei mallin sovellustilanteessa olisikaan käytettävissä, voidaan kyseiselle tunnukselle antaa mallin laadintavaiheessa periaatteessa vaikka rajattomasti painoa. Tällöin myös sovellusvaiheessa voidaan saada runkoluvun kannalta hyviä tuloksia, vaikka käytetäänkin pohjapinta-alaa jakauman painotuksessa ja skaalauksessa.

Kalibrointiestimointia ei tässä yhteydessä hyödynnetty ennustetun jakauman muotoilussa. Menetelmä voidaan kuitenkin helposti liittää mihin tahansa puujoukonmuodostusmenetelmään. Tällöin runkoluvullisten mallien tuottamien runkolukuennusteiden keskivirheellä ja harhalla ei periaatteessa olekaan ensisijaista merkitystä, koska kalibroinnin avulla runkoluvun ennustamisvirhe saadaan poistettua lähes kaikissa tilanteissa. Menetelmän tehokkuus pätee kuitenkin vain oikeiden keskitunnusten tapauksessa. Kalibroinnin tuottama hyöty ei ole yksiselitteistä sovellustilanteissa, joissa käytettävä lisäinformaatio sisältää mittaus- ja otosvirhettä.

Koska kalibrointiestimoinnin avulla runkoluku saadaan kuvautumaan virheettömästi myös pohjapinta-alan läpimittajakaumissa, kannattaisi mallien jatkekehittelyssä keskittyä nimenomaan tilanteisiin, joissa runkolukua ei ole tiedossa. Tällaisissa tilanteissa mallit tulisi laatia niin, että runkoluku ja sitä kautta myös puuston rakenne kuvautuisi kuitenkin mahdollisimman realistisesti.

Prosenttiosuusmallien parhaillaan käynnissä oleva kehitystyö liittyykin mallien laadintaan kiinteästä koeala-aineistosta, jakauman alkupään entistä tarkempaan kuvaamiseen vaihtelevien prosenttipisteiden avulla, runkoluvun käyttöön lisäinformaationa runkoluvutonta mallia laadittaessa sekä jakauman jatkuvaksi muuttamisessa käytetyn spli-

ni-interpoloinnin ominaisuuksien jatkotutkimuksiin. Kuvauspuiden tuottamisessa prosenttiosuusmalleja voitaisiin hyödyntää myös siten, että käytettäisiin kuvauspuina suoraan alkuperäisiä ennustettuja prosenttipisteitä.

Sovelletuista menetelmistä niin prosenttiosuusmenetelmä, Johnsonin S_B -jakauma kuin myös ei-parametriset menetelmät ovat toisiinsa nähden hyvin yhdenvertaisia talousmetsissä. Weibull-jakaumankaan soveltaminen jatkossakin ei ole pois suljettua, sillä myös sen osalta puuttuvat mallit, jotka olisivat laadittu laaja-alaisista kiinteäsäteisistä koeala-aineistoista. Näin ollen tähänastiset vertailut eri menetelmien välillä eivät missään nimessä kerro lopullista totuutta, mikäli sellaista yleensä on olemassakaan.

Jos taas halutaan kehittää läpimittajakaumien ennustemalleja talousmetsistä selvästi poikkeaviin erityisolosuhteisiin, kuten esimerkiksi luonnontilaisiin metsiin, on näiden metsien erittäin suuresti vaihtelevan metsikkörakenteen takia mahdollisimman joustavien mallien käyttö suositeltavaa. Tällaiset menetelmät, kuten prosenttiosuusmalli, pystyvät myös ennustamistilanteessa tuottamaan esimerkiksi useampihuippuisia jakaumia. Todennäköisyysjakaumien tapauksessa vastaavien jakaumien estimointi edellyttää jo erityismenetelmiä (esim. Cao ja Burkhart 1984, Zhang ja Lin 2001) eikä niiden soveltaminen ennustamistilanteessa yleensä ole edes mahdollista.

Läpimittajakaumamallien lisäksi myös puiden pituuksien ennustamiseen kannattaisi kiinnittää entistä enemmän huomiota. Mikäli tarkastellaan vain mallivirheitä, on pituusmallin vaikutus tilavuuden virheeseen selvästi läpimittajakaumaa suurempi (Kangas ja Maltamo 2000c, 2002). Pituusmallien osalla erityisesti entistä tehokkaampien kalibrointimittausten ja -menetelmien kehittäminen on ensisijaisen tärkeää. Lisäksi pitäisi pystyä ottamaan huomioon läpimittaluokittainen vaihtelu pituusennusteissa.

Yksittäisten mallien lisäksi kuvioittaista arviointia pitää jatkossa pyrkiä kehittämään kokonaisuutena, jossa optimoidaan menetelmän edellyttämiä malleja, mittauksia ja kustannuksia halutulla tarkkuustasolla sekä myös vaihtelevankokoisella tarkastelualueella (Kangas ja Maltamo 2002). Tällöin puusto-osite-
tasolla tehtävät mittaukset voivat vaihdella hyvin paljon nykyisestä tasamääräisen ja samalla

oletetun tasalaatuisen mittaustiedon periaatteesta. Vastaavasti myös käytettävät mallit voivat vaihdella jopa yksittäisen kuvion eri puusto-ositteissa. Jo tämänkin tutkimuksen tulosten perusteella voidaan periaatteessa suositella erilaisten mallien käyttöä erikokoisissa puustoissa. Keskeisenä menetelmänä tämänsuuntaisessa kehitystyössä tulee jatkossa olemaan nimenomaan kalibrointiestimoinnin hyödyntäminen.

Vaihtoehtoisesti kuvioittaista arviointia voidaan kehittää myös kaukokartoitusinformaation entistä tehokkaamman hyödyntämisen suuntaan. Tällöinkin varsin keskeisessä roolissa tulee olemaan erilaisten tietolähteiden optimaalinen yhdistäminen ja inventoinnin tarkastelu kokonaisuutena niin tarkkuuden kuin kustannustenkin kannalta. Läpimitta- ja pituusjakaumamallien tarve tulee tässäkin tapauksessa olemaan hyvin keskeisellä sijalla (esim. Maltamo ym. 2002).

Kiitokset

Tekijät haluavat kiittää käsikirjoituksen luenutta Kari T. Korhosta, jonka antama palaute on ollut arvokasta artikkelin viimeistelyssä. Tekijät haluavat lisäksi kiittää Valtakunnan metsien inventoinnin tutkimusohjelmaa, joka antoi käyttöömmme VMI-aineiston ja joka tältä osin mahdollisti tutkimuksen toteutuksen.

Kirjallisuus

- Anttila, P., Haara, A., Maltamo, M., Miina, J. & Päivinen, R. 2001. Metsän mittauksen tutkimusaineistoja. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta tiedonantoja 128. 9 s + cd-rom.
- Borders, B.E., Souter, R.A., Bailey, R.L. & Ware, K.D. 1987. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. *Forest Science* 33: 570–576.
- Cao, Q.V. & Burkhart, H.E. 1984. A segmented approach for modeling diameter frequency data. *Forest Science* 30: 129–137.
- Deville, J.-C. & Särndal, C.-E. 1992. Calibration estimators in survey sampling. *Journal of American Statistical Association* 87: 376–382.
- Gustavsen, H.G., Roiko-Jokela, P. & Varmola, M. 1988.

- Kivennäismaiden talousmetsien pysyvät (INKA ja TINKA) kokeet: Suunnitelmat, mittausten menetelmät ja aineistojen rakenteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 292. 212 s.
- Hynynen, J. 1996. Puuston kehityksen ennustaminen MELA-järjestelmässä. Teoksessa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). 1996. Puuston kehityksen ennustaminen – MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612. 116 s.
- , Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 116 s.
- Hökkä, H., Piironen, M-L & Penttilä, T. 1991. Läpimittajakauman ennustaminen Weibull-jakaumalla Pohjois-Suomen mänty- ja koivuvaltaisissa ojitusaluemetsiköissä. *Folia Forestalia* 781. 22 s.
- Kangas, A. & Maltamo, M. 2000a. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. *Forest Science* 46: 390–396.
- & Maltamo, M. 2000b. Percentile based basal area diameter distribution models for Scots pine, Norway spruce and birch species. *Silva Fennica* 34: 371–380.
- & Maltamo, M. 2000c. Performance of percentile based diameter distribution prediction and Weibull method in independent data sets. *Silva Fennica* 34: 381–398.
- & Maltamo, M. 2002. Anticipating the variance of predicted stand volume and timber assortments with respect to stand characteristics and field measurements. *Silva Fennica* 36(4) (painossa).
- , Heikkinen, E. & Maltamo, M. 2002. Puustotunnusten maastoarvioinnin luotettavuus ja ajanmenekki. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 425–440. (tämä nide)
- Kilkki, P. & Siitonen, M. 1975. Simulation of artificial stands and derivation of growing stock models from this material. *Acta Forestalia Fenniae* 145. 33 s.
- & Päivinen, R. 1986. Weibull function in the estimation of the basal area DBH-distribution. *Silva Fennica* 20: 149–156.
- , Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R. 1989. Use of the Weibull function in estimating the basal area diameter distribution. *Silva Fennica* 23: 311–318.
- Kärki, T., Maltamo, M. & Eerikäinen, K. 2000. Diameter distribution, stem volume and stem quality models for grey alder (*Alnus incana*) in eastern Finland. *New Forests* 20: 65–86.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curves and volume functions for pine, spruce and birch. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Lether, F.G. 1984. A FORTRAN implementation of Späth's interpolatory rational spline: drawing a taut smooth curve through data points. Department of Mathematics, University of Georgia, Athens. Technical Report WL 22. 24 s.
- Mabvurira, D., Maltamo, M. & Kangas, A. 2002. Predicting and calibrating diameter distributions of *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. Ilmestyy sarjassa *New Forests*.
- Malinen, J. [Juha], Maltamo, M. & Nuutinen, T. 1999. Suunnittelun lähtötietojen laskennallinen ajantasaistus – esimerkkinä MELA. Teoksessa: Heikinheimo, M. (toim.). Metsäsuunnittelun tietohuolto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 741. s. 58–68.
- Malinen, J. [Jukka], Maltamo, M. & Harstela, P. 2001. Application of most similar neighbor inference for estimating characteristics of a marked stand using stem database. *International Journal of Forest Engineering* 12: 33–41.
- Maltamo, M. 1997. Comparing basal area diameter distributions estimated by tree species and for the entire growing stock in a mixed stand. *Silva Fennica* 31: 53–65.
- 1998. Basal area diameter distribution in estimating the quantity and structure of growing stock. University of Joensuu, Faculty of Forestry. 43 s.
- 2001. Metsävaratiotojen optimaalinen hyödyntäminen. Teoksessa: Nuutinen, T. & Suokas, A. (toim.). MELA2000 ja muuttuva metsänkäsittely, MELA-käyttäjäpäivä 21.11.2000 Joensuu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 814. s. 62–73.
- & Kangas, A. 1998. Methods based on k-nearest neighbor regression in the estimation of basal area diameter distribution. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1107–1115.
- & Laukkanen, S. 2001. (toim.). Metsää kuvaavat mallit. *Silva Carelica* 239 s.
- , Puumalainen, J. & Päivinen, R. 1995. Comparison of beta and Weibull functions for modelling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* 10: 284–295.
- , Kangas, A., Uuttera, J., Torniainen, T. & Saramäki, J. 2000. Comparison of percentile based predicted methods and Weibull distribution in describing diameter distribution of heterogeneous Scots pine stands. *Forest Ecology and Management* 133: 263–274.
- , Tokola, T. & Lehikoinen, M. 2002. Estimating stand characteristics by combining single tree pattern recognition of digital video imagery and a theoretical diameter distribution model. Ilmestyy sarjassa *Forest Science*.
- Mielikäinen, K. 1980. Mänty-koivu-sekametsien raken-

- ne ja kehitys. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 99. 82 s.
- 1985. Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 133. 79 s.
- Mykkänen, R. 1986. Weibull-funktion käyttö puuston läpimittajakauman estimoinnissa. *Metsätalouden syventävien opintojen tutkielma*. Joensuu. 80 s.
- Nalli, A. & Hyttinen, P. 1992. Metsätalouden suunnittelujärjestelmien nykytila Suomessa. Teoksessa: Päivinen, R., Kangas, J. & Varjo, J. (toim.). *Katsaus metsätalouden suunnitteluun Suomessa ja Ruotsissa*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 406: 23–35.
- Nuutinen, T. 1986. Puustotunnusten väliset relaatiot. *Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma*. Joensuun Yliopisto. 53 s.
- Oksanen-Peltola, L. 1999. Johdanto. Teoksessa: Heikinheimo, M. (toim.) 1999. *Metsäsuunnittelun tietohuolto*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 741: 5–7.
- Penttilä, T. & Honkanen, M. 1986. Suometsän pysyvien kasvukoealojen (SINKA) maastotyöohjeet. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 226. 98 s.
- Poso, S. 1983. Basic features of forest inventory by compartments. *Silva Fennica* 17: 313–349.
- Pussinen, A. 1992. Ilmakuvat ja Landsat TM-satelliittikuva välialueiden kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma*. Joensuun yliopisto. 48 s.
- Pysyvien koealojen 3. mittaus 1995. Maastotyön ohjeet: kuvio- ja puustotiedot, näytteiden keruu. *Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus*. 104 s. + liitteet.
- Päivinen, R. 1980. Puiden läpimittajakauman estimointi ja siihen perustuva puustotunnusten laskenta. *Folia Forestalia* 442. 28 s.
- Redsven, V., Anola-Pukkila, A., Haara, A., Hirvelä, H., Härkönen, K., Kärkkäinen, L., Lempinen, R., Muinonen, E., Nuutinen, T., Salminen, O. & Siitonen, M. 2002. *MELA2002 Reference Manual*. Metsäntutkimuslaitos. Käsikirjoitus. 572 s.
- Siipilehto, J. 1988. Metsätaloustutkimusten läpimittajakaumien ennustaminen Betafunktiolla. *Syventävien opintojen tutkielma*. Helsingin yliopisto. 70 s.
- 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 33: 281–301.
- 2000. A comparison of two parameter prediction methods for stand structure in Finland. *Silva Fennica* 34: 331–349.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Hirvelä, H., Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996. *MELA Handbook 1996 Edition*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 622. 452 s.
- Solmu. Maastotyöopas. 1996. *Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio*. 80 s.
- Uusitalo, J. 1995. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 9. 96 s.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi. 1986. *Kenttätöön ohjeet*. Metsäntutkimuslaitos, metsänarvioimisen tutkimusosasto, metsäinventoinnin tutkimussuunta. Helsinki. Moniste. 86 s. + 20 liitettä.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männyille, kuuselle ja koivulle. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yliopisto. 59 s. + liitteet 29 s.
- Verkasalo, E. 1997. Hieskoivun laatu vaneripuuna. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 632. 483 s.
- Vuokila, Y. 1959. Relaskooppimenetelmän tarkkuudesta puuston arvioinnissa. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 51. 62 s.
- Zhang, L. & Lin C. 2001. Use of a finite mixture model in describing irregular diameter distributions of forest stands. Teoksessa: LeMay, V. & Marshall, P. (toim.). *Forest modelling for ecosystem management, forest certification, and sustainable management*. Proceedings of the conference held in Vancouver, BC, Canada, August 12 to 17, 2001. s. 451–461.

54 viitettä