



Lauri Kuusisto



Annika Kangas

Lauri Kuusisto ja Annika Kangas

Harhakomponentit kuvioittaisen arvioinnin puuston tilavuuden laskentaketjussa

Kuusisto, L. & Kangas, A. 2008. Harhakomponentit kuvioittaisen arvioinnin puuston tilavuuden laskentaketjussa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2008: 177–190.

Suunnittelujärjestelmät ennustavat kuvioittaisessa arvioinnissa mitattujen keskitunnusten perusteella puulajeittain kokonaistilavuudet sekä puutavaralajien tilavuudet. Laskenta perustuu jakaumamallin, pituusmallin sekä runkokäyrämallin käyttöön. Puutavaralajien tilavuudet voidaan laskea järjestelmissä teoreettisina, puutavaralajien yläläpimittavaatimuksien perusteella, tai ottaa huomioon myös katkonnan vaikutus. Katkonnan vaikutus taas voidaan ottaa huomioon empiirisellä mallilla, tai apteeraamalla järjestelmän tuottamat kuvauspuut simulaattorissa. Tässä tutkimuksessa tavoitteena on selvittää, miten suunnittelujärjestelmän laskenta kannattaa toteuttaa. Tutkimuksessa selvitetään, mistä komponenteista puutavaralajien tilavuuksien virheet koostuvat, ja mihin laskentajärjestelmässä siis kannattaa kiinnittää huomiota. Tutkimus tehtiin vertaamalla laskentajärjestelmän tuottamia arvoja MASI apteeraussimulaattorin tuottamiin. Virheet jaettiin runkokäyrämallin, pituusmallin sekä jakaumamallin aiheuttamiin komponentteihin. Näistä runkokäyrän vaikutusta ei ole aiemmissa tutkimuksissa voitu ottaa huomioon. Tutkittu malliketju tuotti järjestelmällisen aliarvion sekä kokonais- että tukkitilavuuksille. Laskentajärjestelmän malleista suurimmaksi virhelähteeksi osoittautui runkokäyrämalli, toiseksi suurimmaksi pituusmalli ja pienin virhelähde oli jakaumamalli.

Asiasanat: apteeraus, runkokäyrät, harha

Yhteystiedot: *Kuusisto*: Stora Enso Metsä, Keskuskatu 19 B, 23800 Laitila;

Kangas: Metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto

Sähköposti lauri.kuusisto(at)storaenso.com, annika.kangas(at)helsinki.fi

Hyväksytty 19.8.2008

I Johdanto

Suomessa metsien hoito ja käsittely perustuvat metsäsuunnittelun yhteydessä tehtäviin mittauksiin ja toimenpide-ehdotuksiin. Suunnitelmien laadinta perustuu kuvioittaiseen arviointiin, jossa suunniteltava alue pyritään jakamaan puustoltaan ja kasvuolosuhteiltaan mahdollisimman homogeenisiin kuvioihin (esim. Koivuniemi ja Korhonen 2006). Kuvioilta määritetään puustoa ja kasvupaikkaa kuvaavat tunnuksot maastomittausten ja/tai kaukokartoitusmenetelmien avulla. Puusto kuvataan puulajeittaisten keskitunnusten, eli pohjapinta-alan, keskiläpimitan, keskipituuden ja iän avulla. Selvästi toisistaan erottuvat jaksot voidaan erottaa omiksi puusto-ositteiksi.

Määritettyjen tunnusten pohjalta ennustetaan mallien ja malliketjujen avulla muita tunnuksia, kuten puuston tilavuus ja kasvu. Suomessa käytävissä suunnittelujärjestelmissä puuston nykyhetken tilavuuden ennustaminen perustuu läpimittajakaumamallin, sekä pituus- ja tilavuusmallin käyttöön. Metsiköistä mitattujen tai arvioitujen keski- ja summatunnusten avulla ennustetaan puulajeittaiset jakaumaparametrit ja muodostetaan läpimittajakauma. Jakauma skaalataan hehtaarikohtaiseksi poimimalla siitä kuvauspuita ja määrittämällä niille edustavuudet tunnetun pohjapinta-alan tai runkoluvun perusteella. Käytettyjä jakaumamalleja ovat mm. Weibull-, Johnsonin S_b - ja betajakauma, sekä ei-parametrinen (tai epäparametrinen) prosenttiosuusmenetelmä (esim. Maltamo 1997, Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2000). Kuvauspuille ennustetaan pituudet pituusmallien (esim. Näslund 1937, Veltheim 1987, Siipilehto 1999) avulla ja edelleen tilavuudet tilavuusyhtälöillä tai runkokäyrillä (Laasasenaho 1982, Lappi 1986).

Erot menetelmien tulosten välillä ovat olleet marginaalisia ja vaihtelevat tutkimuksesta riippuen. Siipilehdon (1999) tutkimuksessa Weibull- ja Johnsonin S_b -jakauma tuottivat samantasoisia tuloksia, kun runkolukua ei tunnettu. Kun runkolukua käytettiin jakaumien ennustamisessa, Johnsonin S_b -jakauma osoittautui Weibull-jakaumaa tarkemmaksi. Kankaan ja Maltamon (2000) vertailussa prosenttiosuusmenetelmä peittosi Weibull-jakauman jälleen kun runkolukua voitiin käyttää kalibrointiin. Ilman

runkolukua menetelmien välille ei juuri syntynyt eroa. Toisaalta vertailututkimukset perustuvat siihen, että keskitunnusten todelliset arvot tunnetaan. Todellisessa tilanteessa niissä on kuitenkin aina arviointivirhettä (esim. Haara ja Korhonen 2004).

Rungon eri puutavaralajien tilavuuksien ennustaminen on mahdollista suoraan runkokäyrillä, joilla voidaan ennustaa haluttujen läpimittojen korkeus rungolla, ja edelleen väliin jäävien kappaleiden tilavuudet (Laasasenaho 1982). Näiden avulla laskeaan rungon tyven ja tukkiosan päättymiskorkeuden välinen tilavuus eli niin sanottu teoreettinen tukki-tilavuus. Tätä ei kuitenkaan kovin usein pystytä kokonaisuudessaan hyödyntämään, koska tukkiosa on jaettava tukeiksi, joilla on tietyt sallitut pituudet ja läpimitat. Tukkien jako eli pölkytys eli apteraus käy hyvin harvoin täysin yhteen koko teoreettisen tukkiosan kanssa. Siksi esimerkiksi MELA ohjelmassa (Siitonen ym. 1996, Redsven ym. 2007) sovelletaan empiirisiä korjausmalleja, ns. sahalaitamalleja, joilla pölkytyksen vaikutus otetaan huomioon. Nämä mallit perustuvat 1970-luvun mittavaatimuksiin. Mittavaatimuksista riippumaton katkenta voidaan toteuttaa ainoastaan apteraamalla puut laskennan yhteydessä annetuilla mittavaatimuksilla.

Lisäksi teoreettinen tukkiosa sisältää usein laatua heikentäviä vikoja, jotka voivat aiheuttaa tukkiosan siirtymistä hukka- tai kuitupuuksi. Tämän vuoksi käytetään esimerkiksi MELA-järjestelmässä erillisiä tukkivähennysmalleja tarkemman ennusteen saamiseksi. MELA05-versiossa käytävissä Mehtälön (2002) tukkivähennysmalleissa on otettu huomioon samanaikaisesti sekä katkonnasta, että runkojen vioista johtuva vähennys. Toinen mahdollisuus on soveltaa Päivisen (1983) tukkiosuusmalleja. Nämäkin mallit on kuitenkin laadittu tiettyjen tukkien läpimitta-pituusyhdistelmien mukaan, jolloin mittavaatimusten muuttuessa mallien käyttökelpoisuus vähenee.

Metsäsuunnitelman ensisijaisena tarkoituksena on toimia metsänomistajan ”oppaana” metsien käsittelyssä ja hoidossa, mutta osaltaan se toimii myös puukaupan apuvälineenä. Suunnittelu- ja hankintatilanteessa määritetyt leimikon puuston laatu- sekä dimensio-ominaisuudet ohjaavat hakkuiden ajoitusta sen mukaan minkälaisella puutavaralla on milloinkin kysyntää. Suunnittelutietoa ei ole pidetty riittävän tarkkana ohjaamaan hakkuiden ajoitusta

ja katkontaa (Räsänen 1999, Imponen 1999). Siksi puun hankinnan ohjaukseen ja sopivan katkontaohjeen valitsemiseksi leimikoissa on kehitetty erilaisia leimikon puuston rakennetta ennustavia menetelmiä, kuten kevyeen ennakkomittaukseen perustuvia menetelmiä (mm. Lemmetty ja Mäkelä 1992, Uusitalo 1995) ja runkopankkiaineistoihin perustuvia ei-parametrisia menetelmiä (mm. Tommola ym. 1999, Räsänen ym. 2000, Malinen ym. 2001, Malinen 2003, Räsänen ym. 2005). Myös kaukokartoitukseen perustuvat sovellukset ovat mahdollisia (esim. Peuhkurinen ym. 2007)

Tukkien katkonta pitkälti määrittelee, millaisia tuotteita niistä voidaan tehdä. Yksittäisten runkojen kokonaisarvo määräytyy näin ollen pitkälti jo katkontavaiheessa (esim. Usenius 1986, Kivinen 2007). Lisäksi yksilölliset tuotteet edellyttävät monesti tukeilta perinteisestä poikkeavia läpimita-pituusyhdistelmiä (Lipponen 2002). Katkonta toteutetaan käytännössä joko arvoapteerauksena tai jakauma-apteerauksena. Arvoapteerauksessa eri läpimita-pituusluokille annetaan arvot niiden taloudelliseen arvoon pohjautuen (arvomatriisi). Jakauma-apteerauksessa määritellään myös jakaumamatriisi, jossa kullekin läpimita-pituusluokalle määritellään tavoiteosuus. Tällöin arvomatriisi on usein tasahintamatriisi eli kaikki kappaleet ovat samanarvoisia. Arvomatriisin avulla metsiköstä pyritään saavuttamaan markkinatilanteen mukainen paras mahdollinen taloudellinen tuotto ja jakaumamatriisin avulla apteerausta ohjataan vastaamaan sahojen ja tehtaiden tarpeisiin. Nämä kaksi eivät välttämättä ole yhteneviä (esim. Kivinen 2007).

Yksittäisten runkojen apteeraus eli pölkytys on toteutettu useimmiten dynaamisen ohjelmoinnin avulla (esim. Puumalainen 1998). Nykyisin yksittäisten runkojen optimaalisen katkonnan määrittämiseen hakkuukoneissa käytetään Uusitalon (2003) mukaan lähes kaikkien valmistajien osalta Näsbergin (1985) väitöskirjassaan esittämää verkkoteorian ja dynaamisen ohjelmoinnin yhdistelmää. Menetelmä perustuu pisimmän eli tässä tapauksessa arvokkaimman reitin määrittämiseen tyvestä latvaan.

Puunhankinnan ohjauksen vaihtoehtotarkasteluihin on kehitetty erityisiä apteeraussimulaattoreita (mm. Räsänen 1999). Niiden avulla voidaan selvittää esimerkiksi sitä, miten tarkasti tukkisaanto pystytään metsäsuunnittelutietojen perusteella

suunnittelujärjestelmissä ennustamaan (Malinen ym. 2007).

Tässä tutkimuksessa verrataan suunnittelujärjestelmän sisältämän malliketjun avulla tuotettuja puujoukkoja Metsätehon kokoamaan runkopankkiaineistoon. Tutkimuksessa verrataan ensin teoreettisia puutavaralajien tilavuuksia katkonta-algoritmin avulla saataviin tilavuuksiin. Tämän jälkeen tarkastellaan malliketjun ja sen eri osien käytöstä aiheutuva harhaa, sekä syitä harhan muodostumiseen kokonais- ja puutavaralajien tilavuuden määrittämisessä. Apteerausten simulointi toteutetaan tutkimuksessa Metsätehon kehittämällä MASI-apteeraussimulaattorilla. Tuloksia käytetään myös selvitetessä miten puutavaralajien tilavuudet kannattaa SIMO suunnittelujärjestelmässä (Tokola ym. 2006) tuottaa.

2 Runkopankkiaineisto

Tätä tutkimusta varten saatiin käyttöön Metsätehon kokoama hakkuukoneiden tuottama yksittäisten runkojen mittausaineisto eli runkopankkiaineisto. Hakkuukoneaineisto on tallennettu Etelä- ja Keski-Suomen alueella vuosien 1997 ja 2002 välisenä aikana hakatuilta leimikoilta (Räsänen ym. 2000, Räsänen ym. 2005). Tutkimustarkoituksia varten alkuperäinen hakkuukoneiden tuottama .stm-muotoinen tieto (yksittäisten runkojen dimensiot, esim. Ovaskainen 2002, StanForD 2007) leimikoilta mitatuista rungoista oli Metsätehon toimesta tiivistetty ja muunnettu Microsoft Access -tietokannaksi.

Hakkuuvaiheessa hakkuukoneet tallentavat rungon läpimittoja 10 cm:n välein alkaen mittauksen hieman eri korkeuksilta ja päättäen sen viimeisen apteerattavan pölkyn latvakatkaisun yläpuolelle. Mittausarvoja syntyy siten yhdestäkin rungosta runsaasti. Jotta laajaa aineistoa voidaan helposti hyödyntää, pitää tietomäärä muuttua ”kevyemmin” käsiteltävään muotoon. Sen sijaan normaalisti maastossa mitattavia rinnankorkeusläpimittaa tai puun pituutta ei runkokäyräaineistossa valmiiksi ole, vaan ne joudutaan laskemaan muiden mittausten perusteella. Tässä tapauksessa aineiston keventäminen toteutettiin tiivistämällä jokaisen puun runkomuoto Laasasenahon (1982) runkokäyräyhtälön parametreiksi hakkuukoneella mitattujen läpimittojen avulla

(Räsänen ym. 1998, Räsänen ym. 2000).

Sovitus suoritettiin neljässä osavaiheessa. Kaikissa osavaiheissa sovellettiin Laasasenahon (1982) runkokäyrää

$$d_{l+h_k} = d_{0,2h} (b_1 \times x + b_2 \times x^2 + b_3 \times x^3 + b_4 \times x^5 + b_5 \times x^8 + b_6 \times x^{13} + b_7 \times x^{21} + b_8 \times x^{34}) \quad (1)$$

missä

d_{l+h_k} = läpimitta etäisyydellä ($l+h_k$) maasta
 $d_{0,2h}$ = läpimitta 20 %:n osakorkeudella maasta
 $b_1 \dots b_8$ = puulajikohtaiset muotoparametrit ja

$$x = 1 - \frac{h_k}{h} \quad (2)$$

missä

l = läpimittahavainnon etäisyys kaatoleikkauksesta
 h_k = kannon korkeus
 h = puun pituus maasta

Ensimmäisessä vaiheessa estimoitavat parametrit olivat h ja $d_{0,2h}$ (Räsänen ym. 1998). Hakkuukoneella mitattujen läpimittojen havaintojoukkoon sovitettiin perusrunkokäyrä pienimmän neliösumman menetelmällä ja etsittiin näille parametreille arvot, joilla havaintojoukon poikkeamat runkokäyrältä minimoituivat. Kannonkorkeudeksi asetettiin 20 cm.

Toisessa vaiheessa saatujen arvojen avulla ratkaistiin rungoille maasta mitattu rinnankorkeusläpimitta. Kun pituus ja läpimitta olivat ennustettu, voitiin niiden perusteella ratkaista myös 3. asteen korjauspolynomi (Laasasenaho 1982). Korjauspolynomin estimoimiseksi muodostettiin yhtälöt mitatun suhteellisen läpimitan sekä perusrunkokäyrän ennustaman suhteellisen läpimitan erotukselle 10, 40 ja 70 % korkeuksilla rungossa. Polynomi ratkaistiin kulkemaan näiden kolmen estimaatin kautta ja saadut korjauspolynomin kertoimet (r_1, r_2, r_3) summattiin perusrunkokäyrän kertoimien (b_1, b_2, b_3) kanssa. Kolmannessa vaiheessa toistettiin ensimmäisen vaiheen estimointi toisessa vaiheessa saaduista korjatuista runkokäyrän parametrein. Neljännessä ja viimeisessä vaiheessa rungon pituus vakioitiin 3. vaiheen lopputuloksen mukaiseksi ja sovitettiin runkokäyrä lopullisesti havaintojoukkoon.

Lopullista runkopankkiaineistoa varten alkupe-
 räisistä hakkuukoneiden tuottamista rungoista jouduttiin hylkäämään yhteensä 7,3 % (Räsänen ym.

2000). Hylkäyksiä tehtiin sekä ennen runkokäyrän sovittamista, että sen yhteydessä. Hylkäyksen aiheuttivat erilaiset epäloogisuudet runkojen muodossa, kuten

- rungon läpimitassa ei muutosta 3 m:n pituudella tai 2 m:n pituudella tyvellä
- läpimittoja ei ollut riittävästi pituuteen nähden tai viimeinen läpimitta oli yli 36 m:n korkeudelta
- pölkkyjä ei ollut, niiden yhteispituus oli alle puolet viimeisestä läpimitan mittauskorkeudesta tai yli 32 m (mm. haaraiset rungot)
- pölkyn latvaläpimitta oli yli 10 mm suurempi kuin alemmalla pölkkyllä

Runkokäyrän sovituksen yhteydessä hylkäyksen aiheuttivat puolestaan seuraavat kriteerit:

- muodostettu rinnankorkeusläpimitta alle 6 cm tai yli 70 cm
- pituus alle 3 m tai yli 37 m
- rinnankorkeusläpimitan ja pituuden suhde ei annetuissa rajoissa
- runko ei kapene riittävästi 1,3 ja 6 m:n välillä (väh. 1 cm kapeneminen)
- muodostetulla runkokäyrällä läpimitta alkaa kasvaa jossakin vaiheessa
- muodostetun runkokäyräyhtälön läpimitan keskivirhe on liian suuri (riippuu puun koosta) (Räsänen ym. 2000).

Runkopankkiaineistosta poimittiin leimikot, joilla on tehty avohakkuu. Näin saadaan lähes täydelliset tiedot leimikolla sijainneesta puustosta. Hakkuukoneelle tallentumatta jäävä puusto sisältää tällöin vain alle 60 mm rinnankorkeusläpimitaltaan olevat puut sekä mahdolliset säästöpuut. Lisäksi runkopankkiaineistosta puuttuvat edellä mainittujen syiden perusteella hylätyt rungot.

Aineistoon valittiin yhteensä 280 leimikkoo. Puulajeista mukaan kelpuutettiin mänty, kuusi ja koivu. Hies- ja rauduskoivuja ei runkopankkiaineistossa ollut eroteltu, joten niitä tarkasteltiin yhtenä yhteisenä ositteena. 201 leimikolla pääpuulaji oli kuusi, 76:lla mänty ja kolmella koivu. Mäntyjä esiintyi 266:lla, kuusia 277:llä ja koivuja 268 leimikolla. Leimikoiden puuston keskitunnukset on esitetty taulukossa 1. Kokonaisuudessaan aineisto sisälsi 239 513 runkoo, joista mäntyjä 49 278 kpl (20,6 %), kuusia 169 745 kpl (70,9 %) ja koivuja 20 490 kpl (8,5 %). Aineisto

Taulukko 1. Puulajeittaiset keskitunnukset tutkimusaineiston leimikoilla (280 kpl).

		N (kpl/ha)	G (m ² /ha)	D _g (cm)	H _g (m)
Mänty	Mean	116	5,9	28,3	22,4
	Min	1	0,002	7,4	6,5
	Max	849	44,3	42,6	28,9
Kuusi	Mean	342	14,1	26,2	20,8
	Min	3	0,1	11,8	9,7
	Max	1777	41,7	35,6	27,4
Koivu	Mean	47	1,1	19,5	19,0
	Min	1	0,01	9,2	11,4
	Max	658	13,3	35,0	26,7

oli siis hyvin kuusivaltainen ja etenkin koivun osuus jäi verrattain pieneksi. Varsinaisia puhtaita koivikoita aineistossa oli vain yksi.

Kultakin leimikolta määritettiin mitattujen runkosen perusteella puulajeittain runkoluku, hehtaarikohdainen pohjapinta-ala, pohjapinta-alalla painotettu keskipituus ja pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, jota käytetään laskennassa pohjapinta-alamediaanipuun läpimitan sijasta. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehtyjen testausten perusteella tällä ei ole vaikutusta lopputulosten tarkkuuteen, mutta laskentaa saatiin huomattavasti nopeutettua ja kevennettyä.

Runkopankkiaineisto sisälsi tutkimuksessa tarvittavat tiedot leimikoiden pinta-aloista ja kasvupaikoista. Leimikoiden pinta-ala oli keskimäärin 1,9 ha ja niiden koko vaihteli välillä 0,2–9,3 ha. Osalla leimikoista (42 kpl) kasvupaikkatyyppejä ei ollut tiedonkeruun yhteydessä määritetty. Niille kasvupaikkatyyppi määritettiin siten, että männiköt oletettiin VT, kuusikot MT ja koivikot OMT:ksi. Samalla periaatteella luokiteltiin myös leimikot (5 kpl), joille runkopankkiaineistossa oli määritetty kasvupaikkatyyppi ”turvemaat”. Näiden tulkintojen jälkeen leimikot jakautuivat kasvupaikoittain seuraavasti: lehtomaisia kankaita (OMT) 26 kpl, tuoreita kankaita (MT) 218 kpl, kuivahkoja kankaita (VT) 34 kpl ja kuivia kankaita (CT) 2 kpl.

3 Menetelmät

3.1 Puujoukon muodostaminen

Leimikosta laskettujen keskitunnusten avulla ennustettiin puuston läpimittajakaumat puulajeittain Weibull-jakaumaa käyttäen. Läpimittajakaumia muodostettaessa oletettiin, että leimikoiden puuston ominaisuuksista ei ole muuta tietoa kuin keskitunnukset (pohjapinta-ala, keskiläpimitta, keskipituus), kuten yleensä kuvioittaisen arvioinnin tapauksessa. Tutkimuksessa käytettiin Weibull-jakauman 2-parametrista muotoa (3)

$$f(d) = \frac{c}{b^c} d^{c-1} \exp\left[-\left(\frac{d}{b}\right)^c\right] \quad (3)$$

missä

d = läpimitta

b = jakauman skaalausparametri

c = jakauman muotoparametri

Tällöin jakauman alarajaa kuvaava parametri a asetetaan nolllaksi.

Jakaumaparametrin c ennustamiseen käytettiin Siipilehdon (1999) tutkimuksessaan esittämiä regressiomalleja. Malleista valittiin niin sanottu G-malli, joka ei vaadi perinteisen metsäsuunnittelun maastotöiden yhteydessä mitattavien tunnusten lisäksi muuta informaatiota. Muuttujina mallissa ovat pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta, puuston pohjapinta-ala, sekä koivulla lisäksi biologinen keski-ikä.

Kun parametri c oli saatu selville, voitiin jakaumaparametri b ratkaista (Kilkki ja Päivinen 1986)

$$b = \frac{d_{gM}}{(-\ln(0,5))^{1/c}} \quad (4)$$

missä d_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta.

Koivulla jakaumaparametrin c ennustaminen vaatii biologisen keski-ian tuntemista. Runkopankkiaineistossa ei ole mitattua tietoa puiden iästä, joten sen määrittämiseen käytettiin Kalliovirran ja Tokolan (2005) kehittämää iän ennustamismenetelmää. Osalla runkopankkiaineiston leimikoista ei ole määritetty sijaintitietoa ja suurin osa leimikoista, joiden sijainti tiedetään, sijoittuu Kalliovirran ja Tokolan (2005)

jaottelussa vyöhykkeelle 2. Tästä syystä päädyttiin käyttämään vyöhykkeen 2 mallia koko aineistolle. Malli antaa tuloksenaan puun rinnankorkeusian, joten biologisen iän saavuttamiseksi siihen on tehty kasvupaikkatyyppien mukainen ikälisäys (Hynynen ym. 2002).

Muodostetuista puulajeittaisista Weibull-jakamista poimittiin kuvauspuita puuston tilavuuden ja puutavaralajijakauman määrittämistä varten yhden sentin luokissa. Leimikon puuston pohjapinta-alana käytettiin todellista, runkopankkiaineiston puista laskettua puulajikohtaista pohjapinta-alaa. Koska MASI-simulaattoriin voidaan syöttää tietoja vain kokonaisista rungoista, piti kuvauspuita lasketut runkoluvut pyöristää. Kun jonkin puulajin pohjapinta-ala leimikolla oli niin pieni, että suurimpien kuvauspuiden osuudeksi tuli alle 0,5, peräkkäiset läpimittaluokat yhdistettiin, jolloin suurien puiden edustavuus lopullisessa puujoukossa kasvoi. Tällöin myös runkoluku saatiin harhattomaksi.

Pituudet puille ennustettiin leimikoittain ja puulajeittain käyttäen Siipilehdon (1999) muunnosta Näslundin (1937) pituusmallista.

Puujoukkojen muodostamisen jälkeen Microsoft Access -tietokantaan tallennettiin runkokohtaiset tiedot kaikista muodostetuista puujoukoista, jotta niitä voitiin jatkossa käsitellä apteeraussimulaattorilla.

3.2 Tilavuuden ja puutavaralajien laskenta

Tilavuusennusteiden tuottamiseen sekä leimikoista laskennallisesti muodostetuille puujoukoille että yksittäin mitatuille rungoille käytettiin MASI-apteeraussimulaattoria. Apteerausta varten jokainen runko kuvataan läpimittojen avulla. Läpimittatiedot on laskettu runkokäyräparametrien, puun rinnankorkeusläpimitan ja pituuden avulla 10 cm:n välein tyvestä latvaan. Laskennallisten puujoukkojen tapauksessa käytettiin Laasasenahon (1982) perusrunkokäyräparametreja ilman korjauspolynomia, eli keskimääräisiä aineiston parametreja.

Itse runkojen apteeraus perustuu Näsbergin (1985) menetelmään. Menetelmä ei ota huomioon rungoissa mahdollisesti esiintyviä vikoja. Tutkimuksessa käytettiin arvomatriisina niin sanottuja tasahintamatriiseja, jolloin jokainen saman puutavaralajin läpimitta-pituusyhdistelmä saa saman arvon. Ta-

Taulukko 2. Apteerauksen simuloinnissa käytetyt puutavaralajien minimiyläläpimitat.

	Kuitu d, (mm)	Pikkutukki d, (mm)	Tukki d, (mm)
Mänty	70	120	150
Kuusi	70	135	160
Koivu	65		200

voitejakautana kaikissa simuloinneissa käytettiin ”nollamatriisia” eli eri pituus-läpimittayhdistelmien haluttavuudelle ei asetettu tavoitetta pölkkyjen lukumäärän osalta. Kaikki apteeraukset suoritettiin samoilla matriiseilla, jotta apteerausten välinen vertailu olisi mahdollista.

Tilavuusennusteissa keskityttiin vain käyttöosan tilavuuden määrittämiseen, joten hukkapuulle ei laskettu ennusteita. Rungot katkottiin kaikkien puulajien osalta kahteen puutavaralajiin; kuitupuuhun ja tukkiin, havupuilla tarkasteltiin lisäksi pikkutukkeja. Katkonnan vaikutusta puutavaralajijakaumaan testattiin selvittämällä miten puutavaralajijakauma muuttuu, jos käytetään pölkkyistä verrattuna tilanteeseen, jossa samat rungot jaetaan puutavaralajeihin teoreettisen tilavuuden perusteella suoraan minimiyläläpimittojen kohdalta. Tukin minimipituutena käytettiin kaikkien puulajien osalta tukeilla 43 dm, ja pikkutukeilla 37 dm. Puutavaralajeille asetetut minimiyläläpimitat on esitetty taulukossa 2.

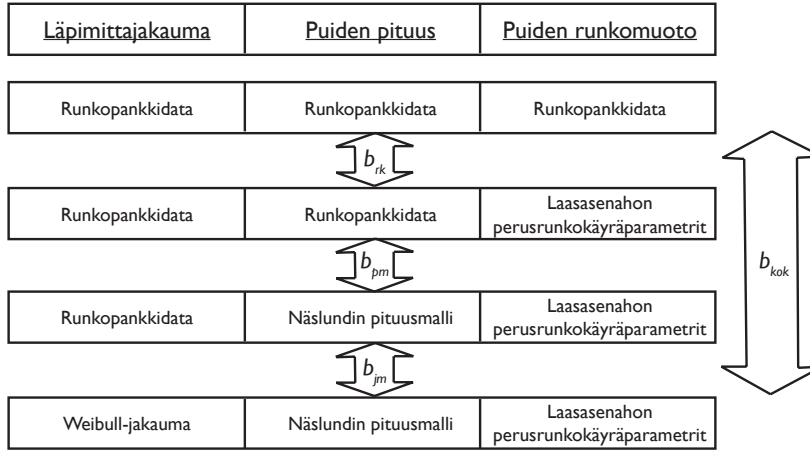
Tilavuusennusteiden tarkkuutta tarkasteltiin vertaamalla leimikkokohtaisesti apteerauksen jälkeen saatuja tilavuuksia mallien avulla ennustettujen puujoukkojen ja alkuperäisten runkopankin puujoukkojen välillä. Vertailu suoritettiin koko leimikon tilavuudelle sekä puulajeittain kokonais- ja tukkitilavuudelle. Tarkasteluissa otettiin huomioon leimikoilta vain ne puulajit, joiden pohjapinta-ala oli vähintään 0,3 m²/ha.

Tuloksissa tilavuusennusteille laskettiin absoluuttiset ja suhteelliset keskivirheet ja harha sekä poikkeamien keskihajonnat (SD).

Absoluuttinen keskivirhe (RMSE),

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - 1}} \quad (5)$$

missä



Kuva 1. Harhan jakaminen komponentteihin.

\hat{y}_i = malliketjulla tuotettu tilavuusennuste leimikolla i
 y_i = runkopankkiaineistosta laskettu tilavuus leimikolla i
 n = leimikoiden lukumäärä

Harha

$$\text{harha} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n \tag{6}$$

Harhan kaavassa negatiiviset arvot kuvaavat malliketjun tuottamaan aliarviota ja positiiviset yliarviota (Schreuder ym. 1993). Suhteelliset keskivirheet ja harhat puolestaan laskettiin jakamalla absoluuttinen arvo runkopankkiaineistosta laskettujen tilavuuksien keskiarvolla.

3.3 Harhan jako komponentteihin

Malliketjujen avulla saatujen tilavuuksien ja puutaralajien harha jaettiin edelleen kolmeen komponenttiin. Osakomponentit ovat 1) puiden runkomuodon ennustaminen runkokäyrien avulla, 2) puiden pituuksien ennustaminen pituusmallin avulla sekä 3) runkolukujakauman ennustaminen Weibull-jakauman avulla. Näiden osavaiheiden harhojen summa muodostaa malliketjun kokonaisharhan (7)

$$b_{kok} = b_{rk} + b_{pm} + b_{jm} \tag{7}$$

missä

- b_{kok} = malliketjun kokonaisharha
- b_{rk} = runkokäyrien aiheuttama harha
- b_{pm} = pituusmallin aiheuttama harha
- b_{jm} = jakaumamallin aiheuttama harha

Osavaiheiden harhojen laskentaa varten muodostettiin erikseen puujoukkoja, joissa muutettiin yhtä malliketjun osaa kerrallaan (kuva 1). Runkomuodon ennustamisesta aiheutuvan harhan selvittämiseksi muodostettiin puujoukko, jossa kaikki runkotiedot otettiin alkuperäisestä runkopankkiaineistosta, mutta niille annettiin runkokäyräparametreiksi Laasasenahon perusrunkokäyräparametrit. Toisessa vaiheessa selvitettiin pituusmallin käytöstä aiheutuva harha vertaamalla edellä muodostetun puujoukon tilavuusennusteita muuten vastaavaan puujoukkoon, mutta jolle runkojen pituudet ennustettiin Siipilehdon (1999) pituusmallilla. Ennustettujen pituuksien avulla niille laskettiin uudet 20%:n osakorkeudet runkokäyrien muodostamista varten. Kolmannessa vaiheessa tämän puujoukon ennusteita verrattiin aiemmin luvun alussa kuvatulla malliketjulla ennustettuun puujoukkoon, jonka leimikoiden läpimittajakaumat oli muodostettu Weibull-funktiolla. Näin saatiin selville jakaumamallin käytöstä aiheutuva harha.

4 Tulokset

Pölkytys ei vaikuta leimikolta saatavan puutavarankokonaistilavuuteen. Runkojen käyttöosa kaatoleikkauksesta kuitupuun minimiyläläpimittaan pystytään useimmissa tapauksissa hyödyntämään kokonaisuudessaan. Sen sijaan pölkytyksellä voidaan vaikuttaa puutavaralajijakaumaan. Teoreettiseen tukkitilavuuteen verrattuna pölkytyksen käyttö luonnollisesti laskee kertynyttä tukkiosuutta kaikilla puulajeilla (taulukko 3). Männyllä muutos oli pienin, 4,5 prosenttiyksikköä ja kuusella selvästi suurin, 13,0 prosenttiyksikköä.

Malliketjuilla ennustetuista ja apteerausimulaattorilla pölkytetyistä puujoukoista lasketut kokonaista tukkitilavuuden keskivirheet (RMSE), harhat ja poikkeamien hajonnat on esitetty taulukossa 4. Malliketjut tuottivat kautta linjan suuria aliarvioita sekä kokonaistilavuudesta että tukkitilavuudesta. Runkopankkiaineistoon verrattuna malliketjut tuottivat kokonaistilavuuden yliarvion vain kolmelle leimikolle,

ja tukkitilavuudelle yliarvio saatiin 10 leimikolle (kuvat 2a ja 2b). Kuvissa esiintyy yksi trendeistä poikkeava leimikko, jossa malliketju tuottaa kokonaistilavuudelle 8,5 % ja tukkitilavuudelle 12,8 % yliarvion. Kyseisellä leimikolla männyllä läpimittajakauma oli kaksihuippuinen, mikä lienee aiheuttanut leimikon poikkeavan tilavuusennusteen.

Kun havaittu harha jaettiin komponentteihin, osoittautui, että perusrunkokäyräparametrien käyttö aiheutti merkittävää aliarviota ennustetilavuuteen kaikilla puulajeilla sekä kokonaista että tukkitilavuudelle (taulukko 5). Kokonaistilavuuden harha oli männyllä $-5,18\%$ (keskihajonta 8,53), kuusella $-4,26\%$ (4,12) ja koivulla $-8,73\%$ (16,71). Tukkitilavuuden aliarvio kattoi kokonaistilavuuden aliarvion lähes kokonaan kuusella ja koivulla, männyllä tukkitilavuuden aliarvio oli jopa keskimäärin $0,15\text{ m}^3/\text{ha}$ suurempi kuin kokonaistilavuuden aliarvio. Näin ollen pikkutukin ja kuitupuun määrälle saatiin lievä aliarvio kuusella ja koivulla, sekä lievä yliarvio männyllä.

Harhan riippuvuutta leimikon puuston koosta tar-

Taulukko 3. Katkongan vaikutus puutavaralajien tilavuuden jakautumiseen.

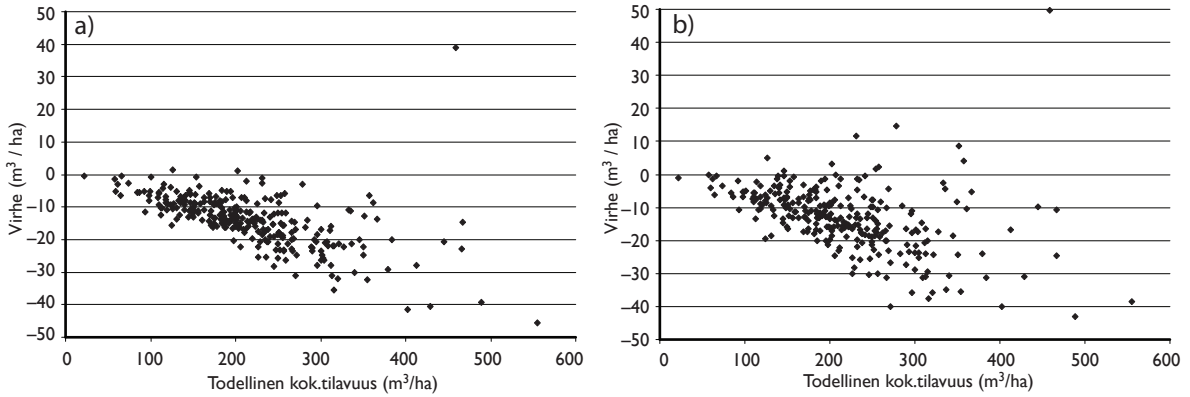
	Teoreettinen tukkiosa			Katkongan optimointi		
	Tukki-%	Pikkut.-%	Kuitu-%	Tukki-%	Pikkut.-%	Kuitu-%
Mänty	88,1	7,0	4,9	83,6	4,1	12,3
Kuusi	80,5	8,5	11,0	67,5	6,9	25,5
Koivu	30,5	–	69,5	21,1	–	78,9

Taulukko 4. Leimikoiden kokonaistilavuuden ja tukkitilavuuden absoluuttiset ja suhteelliset keskivirheet, harhat ja poikkeamien keskihajonnat.

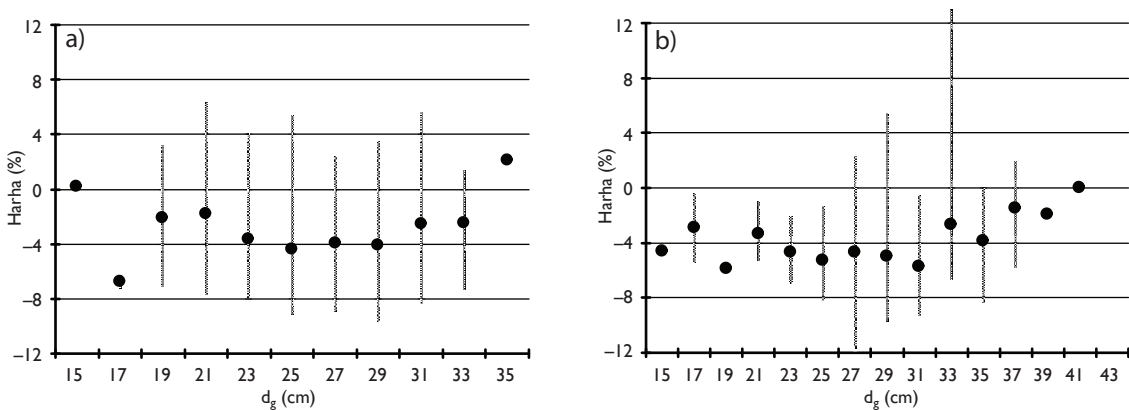
	RMSE		Harha		Keskihajonta	
	m^3/ha	%	m^3/ha	%	m^3/ha	%
kokonaistilavuus	16,21	7,50	$-13,94$	$-6,45$	8,22	3,80
tukkitilavuus	16,32	10,20	$-12,96$	$-8,10$	9,89	6,18

Taulukko 5. Perusrunkokäyräparametrien käytön aiheuttamat absoluuttiset ja suhteelliset harhat leimikoiden kokonais- ja tukkitilavuuksissa.

	Kokonaistilavuus				Tukkitilavuus			
	Harha (m^3/ha)		Harha (%)		Harha (m^3/ha)		Harha (%)	
	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd
Mänty	$-3,61$	5,95	$-5,18$	8,53	$-3,76$	6,54	$-6,32$	10,98
Kuusi	$-6,56$	6,34	$-4,26$	4,12	$-6,36$	6,73	$-5,74$	6,07
Koivu	$-0,35$	0,66	$-8,73$	16,71	$-0,20$	0,69	$-4,87$	16,52



Kuva 2. Kokonais- (a) ja tukkitilavuuden (b) virhe käyttöpuun kokonaistilavuuden funktiona.



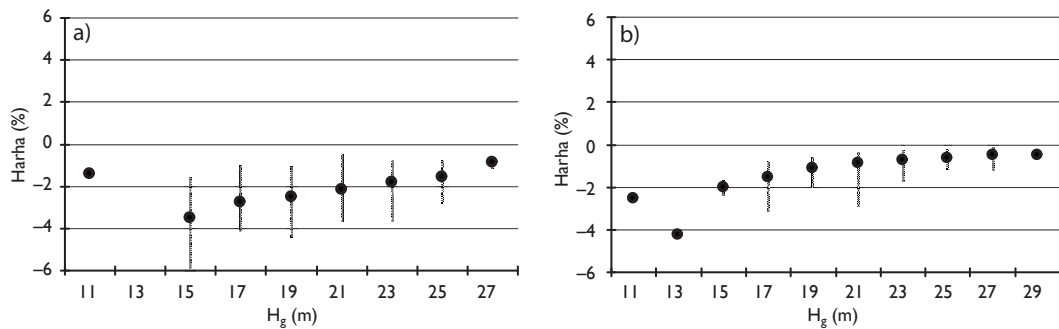
Kuva 3. Laasasenahon runkokäyräparametreilla ennustettujen tilavuuksien harhan riippuvuus puuston pohjapinta-alalla painotetusta keskiläpimitasta kuusella (a) ja männyllä (b).

kasteltiin jakamalla leimikot puulajin keskiläpimitan perusteella kahden senttimetrin luokkiin ja laske-
malla harha kussakin luokassa. Tarkastelu tehtiin
kuuselle ja männylle. Selkeää trendiä tuloksissa ei
havaittu. Kuusella suurimmat aliarviot saatiin 22–30
senttimetriä keskiläpimitaltaan olevissa leimikoissa
(kuva 3a). Tähän väliin kuului 208 leimikkoa, joka
on 78 % kaikista kuusia sisältäneistä leimikoista.
Männyllä suurimmat keskimääräiset aliarviot olivat
23–31 senttimetrin läpimittaluokissa (kuva 3b). 90
prosenttia eli 217 kappaletta mäntyjä sisältäneistä
leimikoista osui kyseiseen joukkoon.

Pituusmallin käyttö aiheutti myös aliarviota tila-
vuuksiin kaikilla puulajeilla (taulukko 6). Kuusella
harha oli kokonaistilavuuden osalta merkittävin,

–2,01 % ja tukkitilavuudenkin osalta yli kaksi pro-
senttia, –2,37 %. Koivulla oli suurin tukkitilavuuden
aliarvio, –2,75 %. Männyllä sekä kokonaistilavuuden,
että tukkitilavuuden harhat olivat yli –1,5 %.
Keskipituuden kasvaessa kokonaistilavuuden suhteellinen
aliarvio pieneni sekä kuusella (kuva 4a)
että männyllä (kuva 4b). Systemaattista aliarviota
esiintyi kuitenkin kaikilla puulajeilla, kun pituus-
mallia käytettiin. Kuusen keskipituus oli 95 % leimi-
koista välillä 16–28 m, ja männyllä samaan väliin
osui 97 % leimikoista.

Weibull-jakauman 2-parametrinen muodon käyttä-
minen läpimittajakaumien muodostamisessa osoit-
tautui tilavuusennusteen osalta verrattain harhattoma-
ksi (taulukko 7). Kokonaistilavuusennusteen har-



Kuva 4. Siipilehdon pituusmallilla ja Laasasenahon runkokäyrämallilla ennustettujen tilavuuksien harhan riippuvuus keskipituudesta kuusella (a) ja männyllä (b).

ha oli kaikilla puulajeilla puolen prosentin luokkaa. Männyn ja kuusen tukkitilavuuden ennusteet olivat käytännössä harhattomia. Koivun tukkitilavuudelle jakaumamallin käyttö sen sijaan aiheutti merkittävän aliarvion, $-16,10\%$.

Selvästi suurin osa malliketjun kokonaisharhasta (taulukko 8) muodostui puiden runkomuodon ennustamisvaiheessa. Runkokäyräparametrien käyttö aiheutti 81% männyn, 66% kuusen ja 60% koivun kokonaistilavuuden harhasta. Pituusmallin käyttö puolestaan aiheutti 12% männyn ja 30% sekä kuusen että koivun kokonaistilavuuden harhasta. Jakaumamallin käytöstä aiheutunut harhan osuus oli kaikkein vähäisin: männyllä 7% , kuusella 4% ja koivulla 10% .

Tukkitilavuuden osalta virhe jakautui hyvin samankaltaisesti kuin kokonaistilavuudenkin osalta (taulukko 8). Runkokäyräparametrien käytöstä aiheutuva virhe selitti jälleen suurimman osan havupuiden kokonaisharhasta: männyllä 86% ja kuusella 72% . Koivulla suurin osuus harhasta, 67% , muodostui läpimittajakaumaa ennustettaessa. Männyn ja kuusen läpimittajakaumien osuus oli käytännössä harhatonta. Pituusmallin käytöstä aiheutui männyllä 14% , kuusella 28% ja koivulla 12% tukkitilavuuden kokonaisharhasta.

5 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa oli tarkoitus testata yksittäisen metsäsunnittelujärjestelmissä käytetyn malliketjun ja apteeraussimulaattorin avulla tuotettujen tilavuusennusteiden tarkkuutta ja verrata niitä hakkuukoneilla kerätystä runkopankkiaineistosta tuotettuihin tilavuusennusteisiin. Tarkastelussa oli käyttöpuun kokonaistilavuuden lisäksi tukkitilavuuksien muodostuminen. Erityisesti tutkittiin eri malliketjun osien vaikutusta ennusteen virheeseen.

Tutkimuksessa käytettävän runkopankkiaineiston keräämiseen on käytetty kahden eri laitevalmistajan, Ponssen ja Timberjackin, hakkuukoneita (Räsänen ym. 2000). Eri valmistajien ja myös yksittäisten hakkuukoneiden mittalaitteissa saattaa olla eroja. Myös hakkuun ajankohta vaikuttaa mittauksen luotettavuuteen sen mukaan ovatko rungot sulia vai jäässä. Kivisen (1990) tutkimuksen mukaan tukkien mittaus onnistuu lähes kaikilla mittalaitteilla luotettavasti. Tukkien pituuden mittauksessa virhe oli enintään ± 3 senttimetriä 74 prosentilla ja enintään ± 5 senttimetriä 89 prosentilla havainnoista. Läpimitan osalta puolestaan virheet olivat enintään ± 2 millimetriä kolmanneksessa havainnoita, ja enintään ± 5 millimetriä kahdessa kolmasosassa havainnoista. Uudemmissa tutkimuksissa, jotka kuvaavat myös aineiston mittausajankohtaa (Sondell ym. 2002) jopa 90% :ssa mittauksista läpimitan virhe on ollut enintään ± 4 millimetriä.

Hakkuukonemittausten yhteydessä ilmenee usein myös oksakyhmyjen, runkovaurioiden tai haarojen

Taulukko 6. Pituusmallin käytön aiheuttamat harhat leimikoiden kokonais- ja tukkitilavuuksissa.

	Kokonaistilavuus				Tukkitilavuus			
	Harha (m ³ /ha)		Harha (%)		Harha (m ³ /ha)		Harha (%)	
	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd
Mänty	-0,52	0,62	-0,78	0,94	-0,61	0,91	-1,09	1,62
Kuusi	-2,96	1,78	-2,01	1,21	-2,47	1,90	-2,37	1,82
Koivu	-0,17	0,20	-1,37	1,61	-0,11	0,32	-2,75	8,07

Taulukko 7. Jakaumamallin aiheuttamat harhat leimikoiden kokonais- ja tukkitilavuuksissa.

	Kokonaistilavuus				Tukkitilavuus			
	Harha (m ³ /ha)		Harha (%)		Harha (m ³ /ha)		Harha (%)	
	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd	keskiarvo	sd
Mänty	-0,36	1,53	-0,54	2,33	0,00	2,55	-0,01	4,63
Kuusi	-0,49	2,16	-0,34	1,49	-0,02	4,60	-0,02	4,51
Koivu	-0,06	0,40	-0,50	3,17	-0,62	0,84	-16,10	21,71

Taulukko 8. Malliketjun eri osavaiheiden käytöstä aiheutuva kokonaistilavuuden harha (m³/ha).

	Kokonaistilavuus				Tukkitilavuus			
	Brk	Bpm	Bjm	Bkok	Brk	Bpm	Bjm	Bkok
Mänty	-3,61	-0,52	-0,36	-4,48	-3,76	-0,61	0,00	-4,37
Kuusi	-6,56	-2,96	-0,49	-10,01	-6,36	-2,47	-0,02	-8,86
Koivu	-0,35	-0,17	-0,06	-0,58	-0,20	-0,11	-0,62	-0,93

aiheuttamia epäloogisuuksia runkojen läpimitan kehityksessä. Tämän tutkimuksen aineistosta kaikki epäloogisuudet runkojen muodossa on karsittu kattavasti pois (Räsänen ym. 2000, Räsänen ym. 2005). Runkokäyräyhtälöiden muodostaminen rungoille tuo oman mahdollisen virhelähteensä tuloksiin. Sovituksissa syntyneet virheet ovat kuitenkin verraten pieniä. Räsänen ym. (2000) laskivat käytetylle aineistolle rungoittaiset keskivirheet, jotka kertovat paljonko jokainen 10 cm:n välein oleva muodostetun yhtälön mukainen läpimitta poikkeaa hakkuukoneen tuottamasta mittausarvosta. Keski- virhe vaihteli luonnollisesti runkojen koon mukaan. Läpimitaltaan alle 15 cm:n männyillä ja kuusilla 99 prosentilla keskivirhe oli alle 3 millimetriä. 15–25 cm:n männyillä 89 prosentilla ja kuusilla 94 prosentilla puolestaan keskivirhe oli alle 3 millimetriä. Yli 25 cm:n männyillä 35 prosentilla keskivirhe oli alle 3 mm ja 85 prosentilla alle 5 mm, sekä kuusilla 57 prosentilla alle 3 mm ja 92 prosentilla alle 5 millimetriä. Koivuilla keskivirhe jäi 74 prosentilla alle 3 millimetrin ja 94 prosentilla alle 5 millimetrin. Sovituksessa lasketun pituuden luotettavuuden ar-

vointi ei ole mahdollista ilman erillistä hukkaosien pituuksien tarkistusmittausta.

Vaikka aineistossa on epävarmuutta, tämän tutkimuksen tuloksiin ne vaikuttavat vain, jos runkopankkirunkojen mittauksissa tai mallien sovituksissa on tapahtunut runkomuotoon systemaattisesti vaikuttava virhe. Läpimitta ja pituus on estimoitu aineistosta, mutta niiden estimointivirheet koskevat tutkitussa tapauksessa sekä malliketjuilla laskettuja että vertailuarvoja, joten ne eivät selitä nyt havaittuja eroja. Aineistoon valituille puille käytetty runkokäyrämalli sinänsä soveltuu, koska aineistosta hylättiin puut, joille runkokäyrän sovitus ei onnistunut. Siten nyt havaittu runkokäyrämallin harha johtuu siitä, että Laasasenahon (1982) mallien alkuperäiset parametrit eivät keskimäärin vastanneet aineiston puittain estimoituja parametreja. Mikäli aineistosta hylkääminen on joidenkin runkojen osalta perustunut poikkeavaan runkomuotoon eikä mittausvirheisiin, kuten karsittaessa on oletettu, todellinen runkokäyrän harha voi hieman poiketa nyt havaitusta. Tätä vaikutusta on kuitenkin mahdotonta arvioida.

Aineiston laajuus oli tässä tutkimuksessa män-

nyn ja kuusen osalta vähintäänkin riittävä. Koivun vähäinen osuus, runkoluku keskimäärin 47 kappaletta ja pohjapinta-ala 1,1 m²/ha, sen sijaan haittasi luotettavien tarkastelujen tekemistä.

Saatujuen tulosten perusteella katkonnan vaikutus tukkien saantoon käytetyssä aineistossa on merkittävä, etenkin kuusen osalta. Tutkimuksessa käytettyjen kuusitukkien mittavaatimusten, minimipituus 43 dm ja minimiläpimittana 16 cm, perusteella tukkisaanto pieneni 13 prosenttiyksikköä teoreettisen tukkiosan tilavuudesta. Osan tukkisaannon pieneneemisestä selittää se, ettei tukki- ja kuiturunkoja ole aineistossa eroteltu. Tällöin pienten runkojen tyviosat, jotka eivät täytä mittavaatimuksia pituuden osalta, kasvattavat leimikon teoreettista tukkitilavuutta. Laatu ei tässä työssä otettu huomioon. Katkonnan ottaminen huomioon suunnittelujärjestelmässä on siis tärkeää, ja mikäli halutaan järjestelmä mittavaatimuksista riippumattomaksi, ainoa mahdollisuus on apteerata kaikki kuvauspuut erikseen.

Malinen ym. (2007) selvitti tutkimuksessaan tukkisaannon ja tukkivähennyksen eroja apteraussimulaattorilla katkotun runkopankkiaineiston sekä MELA96- ja MELA05-järjestelmillä laskettujen ennusteiden välillä. Kun laatuviat otettiin huomioon aineistossa, tukkiprosentit olivat näillä järjestelmillä männyllä 71 % ja 63 %, kuusella 72 % ja 56 %, sekä koivulla 36 %. Näistä suuremmat, MELA96-järjestelmän mukaiset arvot vastaavat myös käytetyn apteraussimulaattorin arvoja. Piiran ym. (2007) tutkimuksessa sekä männyn että kuusen tukkisaannoksi saatiin noin 75 %, kun apterauksen simuloinnissa oli huomioitu myös laatuvaatimukset.

Tukkivähennykset olivat männylle MELA96 versiossa 16 % ja MELA05 versiossa 24 %, kuuselle vastaavasti 2 % ja 18 % (Malinen ym. 2007). Kun laatuviat otettiin huomioon, tukkiprosentit olivat 87 % männylle, 74 % kuuselle ja 67 % koivulle. Tämän tutkimuksen luvut ovat havupuille täysin vastaavat, mutta koivulle huomattavasti alhaisemmat. Tukki- ja kuiturunkojen ottaminen mukaan suunnittelujärjestelmässä olisi siis myös ensiarvoisen tärkeää. Koska Mehtätalon (2002) malleissa ovat mukana sekä katkonnasta että vioista aiheutuvat vähennykset, niitä ei voida soveltaa apterauksen yhteydessä, kun taas Päivisen (1983) mallit soveltuvat käytettäväksi myös apterauksen yhteydessä. Toisaalta Päivisen malleissa selittäjinä ovat vain puun ikä ja

läpimitta. Olisikin tarpeen tehdä suunnittelua varten sellaiset eri olosuhteisiin soveltuvat mallit, joissa olisi otettu huomioon vain vikaisuuksista aiheutuvat vähennykset.

Tilavuusennusteiden harhaisuus ja etenkin harhan lähde olivat yllätyksiä. Runkojen muodon ennustaminen osoittautui käytetyn malliketjun heikoimmaksi lenkiksi. Käytetty aineisto oli keskimäärin perusrunkokäyräparametrien laadinta-aineistoa (Laasasenaho 1982) järeämpää, tosin leimikoiden keskiläpimitalla ei näyttänyt olevan vaikutusta harhan suuruuteen. Kalibroimattomat Laasasenahon (1982) perusrunkokäyräparametreilla lasketut runkokäyrät tuottivat selvästi pienemmän tilavuusennusteen, kuin hakkuukoneaineistoon sovitettujen runkokäyrät. Lähes koko saatu ero muodostui tukkitilavuuksien välille. Lisätutkimuksia olisikin syytä tehdä sen suhteen onko puiden runkomuoto kenties muuttunut viimeisen 25 vuoden aikana ja olisiko perusrunkokäyräparametreille syytä tehdä laajamittaisempi kalibrointi.

Tilavuusennusteiden virheeseen jakauman käytöllä ei ollut käytännössä mitään merkitystä. Kokonaistilavuuden osalta jakauman aiheuttama harha oli kaikilla puulajeilla –0,5 prosentin luokkaa ja tukkitilavuusennusteet olivat männyllä ja kuusella täysin harhattomia. Tulokset tukevat aiempia tutkimuksia, joissa jakaumamalleilla (Kangas ja Maltamo 2000) on päästy hyvin pieniin virheisiin tilavuusennusteissa, kun pituutta ei ole otettu huomioon (laskenta perustui pelkästään läpimittaa selittäjänä käyttävään tilavuusmalliin).

Pituusmallin aiheuttamalla harhalla ei ollut merkittävää vaikutusta malliketjun kokonaisvirheeseen männyllä ja koivulla. Kuusen kokonais- ja tukkitilavuuden virheestä noin kolmannes johtui pituusmallin käytöstä. Kuusiaineistossa pituusvaihtelu leimikoiden sisällä oli suurempaa, mikä selittänee osan pituusmallin aiheuttamasta harhasta. Pituusmallilla olisi voinut odottaa olevan huomattavasti suurempikin vaikutus, sillä tilavuusennusteiden virheet ovat olleet huomattavasti suurempia kun pituus otetaan laskennassa huomioon (Maltamo ym. 2002) kuin silloin kun pituutta ei ole mukana (Kangas ja Maltamo 2000).

Kirjallisuus

- Haara, A. & Korhonen, K. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835. 116 s.
- Imponen, V. 1999. Puutavaralogistiikka pelkistää hankinnan toimintamallit. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1999: 722–726.
- Kalliovirta, J. & Tokola T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39(2): 227–248.
- Kangas, A. & Maltamo, M. 2000. Performance of percentile based diameter distribution prediction and Weibull method in independent data sets. *Silva Fennica* 34(4): 381–398.
- Kilki, P. & 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.
- Kivinen, V.-P. 1990. Tutkimus monitoimikoneiden mitalaitteista. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 53. 49 s.
- 2007. Design and testing of stand-specific bucking instructions for use on modern cut-to-length harvesters. *Dissertationes Forestales* 37. 65 s.
- Koivuniemi, J. & Korhonen, K. 2006. Inventory by compartments. Luku 16, s. 271–278. Teoksessa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.). *Forest inventory, methods and applications*. Managing Forest Ecosystems 10. Springer, Dordrecht. 362 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Lappi, J. 1986. Mixed linear models for analyzing and predicting stem form variation of Scots pine. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 134. 69 s.
- Lemma, J. & Mäkelä, M. 1992. Suunnittelumittauksen perusteet ja toteutus. *Metsätehon katsaus* 11/1992. 4 s.
- Lipponen, P. 2002. Puunhankinnan logistiikka. *Tapion taskukirja* 2002: 432–436.
- Malinen, J. 2003. Locally adaptable non-parametric methods for estimating stand characteristics for wood-procurement planning. *Silva Fennica* 37(1): 109–120.
- , Maltamo, M. & Harstela, P. 2001. Application of most similar neighbor inference for estimating marked stand characteristics using harvester and inventory generated stem databases. *International Journal of Forest Engineering* 12(2): 33–41.
- , Kilpeläinen, H., Piira, T., Redsvén, V., Wall, T. & Nuutinen, T. 2007. Comparing model-based approaches with bucking simulation-based approach in the prediction of timber assortment recovery. *Forestry* 80(3): 309–321.
- 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.
- , 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.
- Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukki-vähennysmallit männylle, kuuselle, koivuille ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575–591.
- Näsberg, M. 1985. Mathematical programming models for optimal log bucking. *Linköping Studies in Science and Technology* 132. 200 s.
- Näslund, M. 1937. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 29. 169 s.
- Ovaskainen, H. 2002. Apteeraussimulaattoreiden tiedostojen yhteensopivuus ja simulaattoreiden katkontatulosten vertailu. 26 s. <http://www.taimetsoi.fi/logistiikka/atyraportti.pdf>
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J., Pitkänen, J. & Packalén, P. 2007. Preharvest measurement of marked stands using airborne laser scanning. *Forest Science* 53: 653–661.
- Piira, T., Kilpeläinen, H., Malinen, J., Wall, T. & Verkasalo E. 2007. Leimikon puutavaralajikertymän ja myyntiarvon vaihtelu erilaisilla katkontaohjeilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2007: 19–37.
- Puumalainen, J. 1998. Optimal cross-cutting and sensitivity analysis for various log dimension constraints by using dynamic programming approach. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13: 74–82.

- Päivinen, R. 1983. Metsikön tukkiosuuden arviointimenetelmä. *Folia Forestalia* 564. 16 s.
- Redsven, V., Hirvelä, H., Härkönen, K., Salminen, O. & Siitonen, M. 2007. MELA2007 Reference Manual. Metsäntutkimuslaitos. 642 s.
- Räsänen, T. 1999. Runkopankki puunhankinnan ohjauksen apuvälineenä. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1999: 727–729.
- , Aaltonen, A., Lindroos, J., Lukkarinen, E. & Vuorenpää, T. 1998. Puustotiedon hankinta hakkuukoneella. *Metsätehon raportti* 44. 32 s.
- , Imponen, V., Lindroos, J., Malinen, J. & Sorsa, J.-A. 2000. Runkopankki puunhankinnan ohjauksen välineenä. *Metsätehon raportti* 94. 42 s.
- , Kuuramaa, I. & Sorsa, J.-A. 2005. Runkopankki ja k-MSN-menetelmä puustotietojen ja pölkkyjakauman ennustamisessa. *Metsätehon raportti* 182. 41 s.
- Schreuder, H., Gregoire, T. & Wood, G. 1993. Sampling methods for multiresource forest inventory. 446 s.
- Siipilehto, J. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 33(4): 281–301.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Hirvelä, H., Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996. MELA Handbook – 1996 edition. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 622. 455 s.
- StandForD. 2007. Standard for forest data and communication. 12 s. Skogforsk.
- Tokola, T., Kangas, A., Kalliovirta, J., Mäkinen, A. & Rasinmäki, J. 2006. SIMO – SIMulointi ja Optimointi uuteen metsäsuunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2006/1: 60–65.
- Tommola, M., Tynkkynen, M., Lemmetty, J., Harstela, P. & Sikanen, L. 1999. Estimating the characteristics of a marked stand using k-nearest-neighbor regression. *Journal of Forest Engineering* 10(2): 75–81.
- Uusitalo, J. 1995. Pre-harvest measurement of pine stands for sawing production planning. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 9. 96 s.
- 2003. Metsäteknologian perusteet. 230 s.
- Usenius, A. 1986. Optimum bucking of sawlog stems taking the customers' needs into account. *Paperi ja Puu* 10: 726–729.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männyille, kuuselle ja koivulle. Pro gradu -tutkielma. Metsänarvioimistieteen laitos, Helsingin yliopisto. 60 s.

42 viitettä