



Risto Ojansuu



Markku Halinen



Kari Härkönen

Risto Ojansuu, Markku Halinen ja Kari Härkönen

Metsätalouden suunnittelujärjestelmän virhelähteet männyn ensiharvennuskypsyyden määrittämisessä

Ojansuu, R., Halinen, M. & Härkönen, K. 2002. Metsätalouden suunnittelujärjestelmän virhelähteet männyn ensiharvennuskypsyyden määrittämisessä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 441–457.

Työssä tarkasteltiin suunnittelujärjestelmän virhelähteiden vaikutusta kuvion ensiharvennuskypsyyden määrityksen luotettavuuteen. Tutkitut virhelähteet olivat kuvioittainen arviointi, kuviota kuvaavan puujoukon generointi metsikkötunnuksista ja kasvun ennustaminen. Tutkimuksen kohteena olivat UPM-Kymmene Oyj:n omistamat männiköt Kainuussa. Puujoukon muodostaminen ja kasvun simulointi tehtiin Mela-suunnitteluohjelmistolla. Simuloitua puuston kehitystä verrattiin koelamittauksiin selvitettyyn kehitykseen 87 kuviolla. Simulointijakson pituuden vaihteluväli oli 1–13 vuotta.

Kuvioittaisen arvioinnin systemaattiset ja satunnaiset virheet olivat selvästi suurin epävarmuuden aiheuttaja tarkastelujakson lopun puustotunnuksissa ja ensiharvennuskypsyyden määrityksessä. Pelkästään kuvioittaisen arvioinnin satunnainen virhe aiheutti merkittävän yliarvion ensiharvennuskypsien männiköiden määrässä. Puuston pituuskehitys aliarvioitiin kasvua ennustettaessa selkeästi, mutta se ei aiheuttanut tutkimusaineistossa yhtään virheellistä harvennuskypsyyden määritystä. Saatujen tulosten perusteella pääteltiin, että satunnainen virhe puustotunnuksissa aiheuttaa metsäalueen ensiharvennusoistuman ennusteeseen yliarvion lyhyellä ajanjaksolla. Inventointivirheillä voi olla ensiharvennuskypsyyttä määrittäessä selvästi suurempi merkitys kuin puujoukon generoimisen virheillä ja kasvun ennustamisen virheillä.

Asiasanat: inventointivirhe, kuvioittainen arviointi, mallivirhe, simulointivirhe
Yhteystiedot: Ojansuu, Metla, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa;
Halinen, UPM-Kymmene Metsä, PL 32, 37601 Valkeakoski;
Härkönen, Metla, Helsingin toimipaikka, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki
Sähköposti risto.ojansuu@metla.fi; markku.halinen@upm-kymmene.com
Hyväksytty 4.9.2002

I Johdanto

I.1 Metsätalouden suunnittelun virhelähteitä

Metsätalouden suunnittelussa selvitetään metsien nykytila inventoimalla. Metsien kehitys ja tulevaisuudessa tehtävien erilaisten hakkuiden sekä metsänhoitotoimenpiteiden vaikutus kuvataan simuloimalla. Simuloinnin alkutietojen virheet ja simulointimallin virheet aiheuttavat suunnitteluun epävarmuutta, jonka merkitys tunnetaan huonosti (Kangas ja Kangas 1997).

Simuloinnin alkutietojen virheeseen sisältyvät inventoinnin virheet ja muuntovirheet, jotka syntyvät muunnettaessa inventoinnissa mitattuja tietoja vastaamaan simulaattorissa käytettävää metsän kuvausta. Inventoinnin virheeseen vaikuttavat otantavirhe, mittausvirhe ja tulosten laskennassa käytettyjen mallien virhe. Otantavirhe on satunnaista ja sen varianssi voidaan estimoida. Mittausvirhe, mukaan lukien luokitteluvirhe, voi olla systemaattista tai satunnaista. Koska kuvioittainen arviointi on osittain subjektiivista, sen otantavirhettä ei voida estimoida ja siinä voi syntyä merkittäviä systemaattisia virheitä (Laasasenaho ja Päivinen 1986). Edellä kuvattuihin virheisiin voidaan vaikuttaa huolellisella inventoinnin suunnittelulla ja koulutuksella.

Merkittävä simuloinnin alkutietojen muunnos tehdään, kun inventointi perustuu kuvioittaiseen arviointiin ja kasvun ennustaminen tapahtuu puumalleilla. Puutiedot generoidaan ennustamalla puiden läpimittajakauma kuviotietojen funktiona (esim. Päivinen 1980, Kilkki ym. 1989). Tästä jakaumasta poimitaan läpimitat metsikköä kuvaaville puille ja niille ennustetaan pituudet puutason malleilla läpimitan ja mahdollisesti metsikkötunnusten funktiona (esim. Veltheim 1987).

Inventointitulosten laskennassa, puutietojen generoinnissa ja kasvun simuloinnissa käytetään malleja. Mallien käytön epävarmuus syntyy yksittäisen mallin ominaisuuksista ja useasta mallista muodostuvan kokonaisuuden, esim. inventointitietojen muunto-ohjelman tai metsän kehityksen simulointiohjelman, ominaisuuksista.

Jos yksittäistä tilastollista mallia sovelletaan siihen populaatioon, jota mallin laadinta-aineisto edustaa,

ennusteen epävarmuuteen vaikuttavat mallin jäännösvirhe, mallin kertoimien epävarmuus, mallin selittävässä muuttujissa olevat virheet ja mallin spesifiointivirhe (Kangas ja Kangas 1997). Mikäli mallia sovelletaan laadintapopulaation ulkopuolelle, laadinta- ja soveltamispopulaatioiden väliset erot voivat aiheuttaa ennusteeseen systemaattista virhettä.

Mallilla ennustettaessa jäännösvirhe on satunnainen. Muut virheet ovat systemaattisia. Vaikka regressiokertoimien epävarmuus on satunnaista, voidaan se mallia sovellettaessa tulkita systemaattiseksi (Lappi 1993). Lisäksi mallin laadinta-aineistossa esiintyvät selittävien muuttujien satunnaisvirheet aiheuttavat mallin kertoimiin systemaattista virhettä, joka voi vaimentaa muuttujan vaikutusta (Fuller 1987, Kangas 1998). Erityinen merkitys on mallin laadinta-aineiston koealakoolla, joka vaikuttaa puuston kilpailua kuvaavien muuttujien kertomiin. Mitä pienempi koeala on, sitä suurempi on satunnainen virhe mitatuissa kilpailumuuttujissa ja sitä enemmän niiden vaikutus kuvautuu harhaisesti regressiomallissa (Stage ja Wykoff 1998).

Useista malleista koostuvassa järjestelmässä voi esiintyä mallien yhteiskäytöstä johtuvaa ennustamisvirhettä. Ketjutetuissa malleissa edeltäjämallin selitettävä muuttuja on seuraajamallin selittävä muuttuja. Edeltäjämallin systemaattinen virhe aiheuttaa systemaattisen virheen seuraajamallin ennusteeseen. Myös edeltäjämallin satunnainen virhe voi aiheuttaa systemaattista virhettä seuraajamallin ennusteeseen, jos seuraajamalli on epälineaarinen edeltäjämallin ennusteen suhteen (Kilkki 1979).

Simulointimallin ennustamisvirhe voidaan korjata ja ennustusvarianssi estimoida, jos simulointisysteemin satunnaisrakenne tunnetaan. Puutteellisen tiedon takia rakennetta joudutaan yleensä yksinkertaistamaan ja/tai osa parametreista arvioimaan subjektiivisesti (esim. Kangas 1996, Kangas 1997).

Pelkkiin mallien ominaisuuksiin perustuvat menetelmät eivät pysty ottamaan huomioon simulointisysteemiin sisältyvää aitoa systemaattista virhettä, koska sitä ei yleensä tunneta. Systemaattinen virhe voi johtua eroista mallin laadinta-aineiston edustaman populaation ja sovelluspopulaation välillä, mallin väärästä spesifioinnista ja selittävien muuttujien virheistä mallin laadinta-aineistossa. Empiirisen tarkastelun avulla saadaan kuva systeemin luotettavuudesta tietyssä populaatiossa riippumatta

järjestelmään sisältyvistä oletuksista ja mahdollisista systemaattisista virheistä.

1.2 Työn tausta ja tarkoitus

UPM-Kymmene Oyj:n (myöhemmin yhtiö) metsille vuonna 1997 tehdystä hakkuulaskelmassa ehdotettiin huomattavasti enemmän kuvioita ensiharvennettaviksi kuin maastossa tehty ensiharvennustarpeen arvio osoitti. Ero oli suurin yhtiön Kainuun hankinta-alueessa.

Hakkuusuunnite yhtiön metsille lasketaan ajan tasalla olevien kuviotietojen perusteella. Hakkuusuunnitteen teossa metsiä oletetaan käsiteltävän yhtiön metsänhoito-ohjeiden mukaisesti. Suunnite lasketaan kymmeneksi vuodeksi kerrallaan. Metsänhoito-ohjeissa kuvion ensiharvennuskypsyyden määrittelyä valtapituudesta riippuvan harvennusrajan avulla. Kuvio on harvennuskypä, kun puuston pohjapinta-ala on harvennusrajan yläpuolella. Hakkuusuunnitteen laskennassa käytetään Mela-suunnitteluohjelmistoa (Siitonen ym. 1996).

Yhtiön kuviotietokanta sisältää kuvioittaiset kasvupaikka-, puusto- ja toimenpidetiedot. Se päivitetään vuosittain laskennallisesti Mela-ohjelmiston kasvumallien avulla. Mikäli kuviolla on tehty toimenpiteitä tai kuviotiedoissa havaitaan epäloogisuutta tai epäillään virheitä esimerkiksi hakkuuiden tai metsänhoitotöiden suunnittelun yhteydessä, kuvio käydään inventoimassa maastossa. Jatkossa tällaista kuvioittaista arviointia kutsutaan päivitysinventoinniksi. Kainuussa kuviotiedot on pyritty päivittämään maastossa toimenpidekiertoa tiheämmin siten, että puuston kehityksen ennustamisen perustana olevat inventointitiedot eivät olisi kymmentä vuotta vanhempia.

Hakkuusuunnitteen määrittelyssä ja kuviotietojen päivityksessä Mela-ohjelmisto käyttää puutason kasvumalleja (Hynynen ym. 2002). Kasvunlaskenta varten muodostetaan kuviotietokannan kuviotiedoista puujoukko, joka vastaa kuvion pohjapinta-alaa, keskiläpimittaa, keskipituutta ja runkolukua. Runkolukusarjat estimoidaan Weibull-funktion avulla, jonka parametrit ennustetaan metsikkö- ja puustotunnuksiin perustuvilla malleilla. Kuuselle käytetään Kilkin ym. (1989) ja muille puulajeille Mykkäsen (1986) esittämiä malleja.

Tässä työssä tarkastellaan hakkuusuunnitteen laadinnassa esiintyvien kuvioittaisen inventoinnin virheiden, puujoukon generoinnista aiheutuneiden virheiden ja kasvumallin virheiden merkitystä kuvion ensiharvennuskypsyyden määrittelyssä. Tutkimuskohteena ovat UPM-Kymmene Oyj:n omistamat metsät Kainuussa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Suunnittelujärjestelmän päivitysinventointi

Yhtiön päivitysinventointi tehdään kuvioittaisena arviointina. Arvioinnin tueksi mitataan jokaiselta kuviolta 4–10 relaskoopikoealaa kertoimella $2\text{m}^2\text{ha}^{-1}$. Arviointiohjeen mukaan koealat sijoitetaan järjestelmällisesti likimain säännöllisin välimatkoin tai ilmakuvien avulla. Vuoteen 1995 saakka mitattavaan puustoon luettiin kaikki puut ja sen jälkeen vain puut, joiden pituus on vähintään puolet valtapituudesta. Puuston järeyden mittana käytetään pohjapinta-alamediaanipuun läpimittaa ja pituustunnuksena mediaanipuun pituutta. Käytännön ohje mediaanipuun määrittämiseksi on laskea toiseksi ohuimman ja toiseksi paksuimman puun läpimittojen keskiarvo. Runkoluku määritetään taimikoissa 5,64 m:n säteisten ympyräkoalojen avulla. Kuvion puustotunnuksien arvio saadaan koealoittaisten tunnusten keskiarvona.

2.2 Kontrolli-inventointi

Kontrolli-inventoinnin tavoitteena oli kuvata ensiharvennusvaiheessa olevien kuvioiden puuston kehitys edellisestä yhtiön päivitysinventoinnista inventointihetkeen. Inventointi tehtiin kesällä 2000. Edellinen päivitysinventointi oli tehty vuosina 1987–1999, joten tarkastelujakson pituuden vaihteluväli oli 1–13 vuotta. Tutkimusalue käsitti yhtiön metsät Hyrynsalmen, Paltamon, Puolangan, Ristijärven, Kajaanin, Kuhmon ja Sotkamon kunnissa.

Tutkimuksen kohteena olivat metsätaloudellisesti tärkeimmillä kasvupaikoilla kasvavat ensiharven-

nusmänniköt. Kuviot ositettiin kasvupaikan mukaan seuraavasti: tuore kangas, kuivahko kangas ja kuiva kangas sekä vastaavien ravinteisuusluokkien suot. Perusjoukoksi rajattiin kustakin kasvupaikkaositteesta nuorin sellainen 5 vuotta laaja ikäluokka, jossa ensiharvennettujen kuvioiden osuus ylitti 25 %.

Kontrolli-inventointi toteutettiin kuvioittaisena koealainventointina käyttäen kolmivaiheista ositettua otantaa. Ensimmäisessä vaiheessa otosyksikkönä oli tila, toisessa vaiheessa kuvio ja kolmannessa vaiheessa ympyräkoela. Ensin perusjoukosta pömittiin pinta-alalla painottaen 30 tilaa. Toisessa vaiheessa tilan kustakin kasvupaikkaositteesta arvottiin pinta-alalla painottaen yksi perusjoukkoon kuuluva kuvio. Mikäli tilalla ei ollut vähintään kahta ehdot täyttävää kuviota, se hylättiin ja korvattiin luette- lon seuraavalla tilalla. Arvontaa jatkettiin, kunnes aineistoon saatiin yhteensä 90 kuviota. Aineistosta hylättiin 3 kuviota, joiden päivitysinventoinnissa ei oltu mitattu keskiläpimittaa. Lopullinen aineisto sisälsi 87 kuviota.

Otannan kolmas vaihe oli koealaotanta, jossa koealat sijoitettiin systemaattisesti kuviolle. Koealaverkko suunniteltiin ennen maastotöitä kartalle. Kuvion koosta riippuen sille pyrittiin saamaan koealoja seuraavasti:

	Kuvion koko, ha					
	0–0,75	0,76–1,50	1,51–2,50	2,51–3,50	3,51–4,50	yli 4,50
Koealojen lukumäärä	4	5	6	7	8	9
Lukumäärän maksimi- poikkeama	1	1	2	2	2	3

Säteeltään 6,91 m:n (pinta-ala 150 m²) koealat sijoitettiin maastoon bussolin ja askelmitan avulla. Niiltä määritettiin kasvumallien vaatimat kasvupaikkatunnukset: pääryhmä (kangas, korpi, räme), metsä- tai suotyyppe, veroluokan alennus (kivinen tai soinen) ja ojitustilanne (ojikko, muuttuma, turvekangas). Koealoilta mitattiin kaikki puut, joiden pituus oli vähintään puolet valtapituudesta. Näistä lukupuista määritettiin puulaji ja mitattiin rinnankorkeusläpimitta (mm) kohtisuoraan koealan sädetä vastaan.

Joka viides puu valittiin koepuiksi, josta mitattiin pituus (dm), pituuskasvu (dm) ja kaksinkertainen

kuoren paksuus (mm) sekä kairattiin läpimitan kasvu. Lisäksi mitattiin koealan paksuimman männyn pituus. Pituuskasvu määritettiin oksakiehkuroista latvasta alaspäin edelliseen päivitysinventoinnin ajankohtaan, jota vastaava pituus mitattiin. Pituusmittaukset tehtiin Vertex-pituusmittarilla ja pituuskasvu laskettiin mittausten erotuksena. Kasvukairaus tehtiin edelliseen päivitysinventointiin saakka, kuitenkin vähintään 10 vuotta taaksepäin.

2.3 Puustotietojen laskenta tarkastelujakson alkuun ja loppuun

Tutkimuksessa tarkasteltiin kasvun simulointijaksoa edellisestä päivitysinventoinnista kontrolli-inventointiin. Kuvion puusto kuvattiin tarkastelujakson alku- ja lopputilassa seuraavilla puulajeittaisilla tunnuksilla: runkoluku, pohjapinta-ala, pohjapinta- alalla painotettu keskiläpimitta sekä vastaava keskipituus. Tarkastelujakson alun ja lopun kuvioittaiset puustotunnukset laskettiin koealoilta mitatuista puista. Tätä varten mitatut lukupuiden tiedot täydennettiin koepuutietojen avulla siten, että kaikista puista tunnettiin puulaji, puun edustama runkoluku hehtaarilla, kuorellinen rinnankorkeusläpimitta ja pituus tarkastelujakson alussa ja lopussa.

Puuttuvat puutunnukset laskettiin koepuista estimoitujen lineaaristen sekamallien avulla. Malleissa satunnainen vaihtelu jaettiin koealojen väliseen ja sisäiseen vaihteluun. Koepuutunnukset ennustettiin lukupuille koealoittain kalibroiduilla malleilla. Käytettyjen lineaaristen sekamallien kiinteät parametrit estimoitettiin ja koealoittaiset satunnaisvaikutukset ennustettiin SAS-ohjelmiston Mixed-proseduurilla (Littell ym. 1996). Samanaikainen estimointi voitiin tehdä, koska samat koepuut olivat käytössä mallin estimoinnissa ja mallien soveltamistilanteessa (Searle 1971).

Puuttuvat puutunnukset ennustettiin kolmessa vaiheessa: (A) lukupuiden pituus tarkastelujakson lopussa, (B) lukupuiden ja koepuiden kuorellinen läpimitta tarkastelujakson alussa ja (C) lukupuiden pituus tarkastelujakson alussa. Runkoluvun oletettiin olevan sama jakson alussa kuin lopussa.

A) Lukupuiden pituudet tarkastelujakson lopussa (h) ennustettiin kuorellisen läpimitan (d) funktiona

Näslundin pituuskäyrällä (Näslund 1936):

$$h = 1,3 + d^2 / (a_{h0} + a_{h1}d)^2 \quad (1)$$

missä a_{h0} ja a_{h1} ovat kiinteitä parametreja. Linearisoitu pituuskäyrä kuvattiin koko aineistosta sekamallilla:

$$d_{ki} / (h_{ki} - 1,3) = a_{h0} + a_{h1}d_{ki} + v_{h0k} + v_{h1k}d_{ki} + e_{h0ki} \quad (2)$$

missä, d_{ki} on puun i läpimitta koelalla k , h_{ki} on vastaava pituus, v_{h0k} on koelan k satunnainen vakio, v_{h1k} läpimitan satunnainen kerroin koelalla k ja e_{h0ki} koelalla k sijaitsevan puun i satunnaisvirhe. Alaindeksi h mallin parametreissa viittaa pituusmalliin.

B) Kuorelliset läpimitat tarkastelujakson alussa ennustettiin kolmessa vaiheessa. Ensin tarvittiin puiden kuorettomat läpimitat jakson lopussa (dw), jotka laskettiin kuorelliseen läpimittaan perustuvan kuorimallin avulla (malli 3). Seuraavaksi ennustettiin puiden kuoreton läpimitta jakson alussa läpimitan kasvumallin avulla (malli 5). Lopuksi laskettiin puiden kuorelliset läpimitat jakson alussa kuorettomaan läpimittaan perustuvalla kuorimallilla (malli 4).

Kuoren kaksinkertaisen paksuuden malli kuorellisen läpimitan funktiona oli muotoa

$$b2_{ki} = a_{b0} + a_{b1}d_{ki} + v_{b0k} + v_{b1k}d_{ki} + e_{b0ki} \quad (3)$$

jossa alaindeksi b mallin parametreissa viittaa kuorimalliin, jossa selittäjänä on kuorellinen läpimitta. Vastaava malli kuorettoman läpimitan funktiona oli

$$b2_{ki} = a_{bw0} + a_{bw1}dw_{ki} + v_{bw0k} + v_{bw1k}dw_{ki} + e_{bw0ki} \quad (4)$$

jossa alaindeksi bw mallin parametreissa viittaa kuorimalliin, jossa selittäjänä on kuoreton läpimitta. Muut merkinnät malleissa 3 ja 4 ovat kuten mallissa 2.

Kuorettomat läpimitat tarkastelujakson alussa laskettiin vähentämällä mallilla 3 ennustetusta kuorettomasta läpimitasta kuoreton läpimitan kasvu (idw) Kasvu ennustettiin mallilla:

$$idw_{ki} = a_{id0t} + a_{id1}dw_{ki} + v_{id0k} + v_{id1k}dw_{ki} + e_{id0ki} \quad (5)$$

jossa alaindeksi id viittaa läpimitan kasvumalliin,

a_{id0t} on kullekin ennustettavalle vuodelle (t) oma kiinteä vakio. Muut merkinnät ovat kuten mallissa 2.

C) Pituudet tarkastelujakson alussa laskettiin vähentämällä jakson pituuskasvu (ih) tarkastelujakson lopun pituudesta. Lukupuiden pituuskasvut ennustettiin tarkastelujakson lopun pituuden ja läpimitan funktiona koepuista estimoidulla mallilla:

$$ih_{ki} = a_{ih0} + a_{ih1}\ln(h_{ki}) + a_{ih2}d_{ki} + a_{ih3}T_k + v_{ih0k} + e_{ih0ki} \quad (6)$$

jossa alaindeksi ih mallin parametreissa viittaa pituuskasvumalliin, T_k on kuvion k maastopäivitysvuosi.

Koalojen puustotunnukset laskettiin esikäsitellyn aineiston mitatuista puista tarkastelujakson alkuun ja loppuun. Kuvioiden puustotunnukset saatiin koelaitteiden arvojen keskiarvoina. Tarkasteltavina puustotunnuksina olivat runkoluku (RLa, RL), pohjapinta-ala (PPAa, PPA), pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (Da , D) ja pohjapinta-alalla painotettu keskipituus (Ha , H). Lisämerkintä a tunnuksen lopussa tarkoittaa tarkastelujakson alkua.

Ensiharvennustarpeen määrittämiseen käytettävä valtapituus laskettiin lisäämällä pohjapinta-alalla painotettuun keskipituuteen 1,75 m. Lisäys on keskiarvo Metsäntutkimuslaitoksen ensiharvennuksen ajankohtaa tutkivan männyn koesarjan koelaitteista valtapituuden ja pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden erotuksista. Koesarjassa on mukana 10 koetta maan eri osissa (Hynynen ja Arola 1999). Erotus oli koesarjan koelaitteilla lähes riippumaton keskipituudesta ja hajonta n . 0,5 m.

2.4 Eri virhelähteiden vaikutuksen laskenta

Työssä erotettiin toisistaan päivitysinventoinnin, puutiedon generoinnin ja kasvun ennustamisen virheiden vaikutus ensiharvennuskypsyyden määrittämiseen. Virheet määritettiin tarkastelujakson lopputilassa kontrollin ja eri tavoin määritellyistä alkutiloista simuloitujen kehitysennusteiden erotuksena (taulukko 1). Kontrollina käytettiin kontrollinventoinnissa mitattua puustoa. Vaihtoehdossa A kehitysennusteen alkutietoina käytettiin kontrolli-

Taulukko 1. Kontrollin ja eri tavoin määritellyistä alkutiloista tehtyjen kehitysnusteiden laskennan periaate sekä eri vaihtoehdoilla tutkitut virhelähteet.

Vaihtoehto	Alkutila: Puustotiedot	Alkutila: Puutiedot	Lopputila: Puu- ja puustotiedot	Tutkittu virhelähde
0			Kontrolli-inventointi	–
A		Kontrolli-inventointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste
B	Kontrolli-inventointi	Puutason tiedon generointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste Puutietojen generointi
C	Päivitys-inventointi	Puutason tiedon generointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste Puutietojen generointi Inventointi

inventoinnissa mitattua kuvioitaista puujoukkoa (koaloittaisten puujoukkojen summa). Kontrollin ja vaihtoehdon A erotus kuvaa pelkän kasvun ennustevirheen vaikutusta lopputilaan. Vaihtoehdossa B kehitysnusteen alkutietoina käytettiin kontrolli-inventoinnin avulla estimoituja puustotunnuksia. Puustotunnuksista generoitiin alkutilan puutiedot kasvun ennustamista varten. Vaihtoehdolla B kuvattiin puutietojen generoinnin ja kasvun ennustevirheen yhteistä vaikutusta. Vaihtoehto C oli samanlainen kuin vaihtoehto B, mutta alkutilan puustotietoina käytettiin päivytysinventoinnin puustotietoja. Erotus sisältää edellisten virhelähteiden lisäksi päivytysinventoinnin virheen.

Kuvioiden kehitys ennustettiin tarkastelujakson alusta loppuun Motti-simulaattorilla, joka on identtinen Mela-ohjelmiston simulointiosan kanssa (Hynynen ym. 2002). Simulaattorin aika-askel on viisi vuotta. Väliarvot interpoloitiin tarvittaessa olettamalla läpimitan ja pituuden kasvujen olevan lineaarisia simulointiaskeleen sisällä. Simulaattorissa valtapituuden kehitysmalli voidaan kalibroida koepuiden avulla. Valtapituusmallin koaloittaista kalibrointia ei käytetty yhtiön hakkuulaskelmassa eikä tässä työssä tehdyissä laskelmissa.

Kuvion ensiharvennuskypsyys tarkastelujakson lopussa määritettiin yhtiön harvennushakkuuohjeiden perusteella (Harvennushakkuut 1998). Niissä pohjapinta-alalla ilmaistu harvennusraja annetaan metsikön valtapituuden funktiona kasvupaikkatyypeittäin. Kangasmailla harvennusrajana käytettiin Pohjois-Suomen harvennusmallien rajaa ja soilla harvennusmallien rajasta vähennettiin 2 m² yhtiön harvennusohjeen mukaisesti. Rajan ylittäneet

Taulukko 2. Otoskuvioiden kasvupaikkajakauma.

Alaryhmä	Kasvupaikkatyyppi			Yhteensä
	Kuivahko	Kuiva	Karukko	
Kangas	31	11	1	43
Korpi	2	1	0	3
Räme	2	21	18	41
Yhteensä	35	33	19	87

kuviot olivat harvennuskypsiä. Ensiharvennuskypsyys määritettiin käyttäen männyn valtapituutta ja kokonaispohjapinta-alaa.

3 Tulokset

3.1 Kuvioiden sisäinen vaihtelu

Kuvioiden pinta-alojen keskiarvo oli 12,2 ha ja vaihteluväli 1,3–49,1 ha. Kuvioista noin puolet sijaitsi kankaalla ja loput olivat pääosin ojitettuja rämeitä (taulukko 2).

Kontrolli-inventoinnin mukaan kuvioiden puustot olivat lähellä ensiharvennusvaihetta vuonna 2000. Puuston kehitysvaihetta ilmentävä keskipituuden keskiarvo oli 11,2 m ja hajonta 1,6 m. Vaihteluväli oli 8,0–16,0 m. Kontrolli-inventoinnin luotettavuutta kuvaava kuvioittainen keskivirhe oli pohjapinta-alassa keskimäärin 1,6 m² (vaihteluväli 0,7–3,5 m²), keskiläpimitassa 1,3 cm (0,2–2,3 cm), keskipituudessa 0,5 m (0,2–1,3 m) ja runkoluvussa 120 ha⁻¹ (41–274 ha⁻¹).

Taulukko 3. Kontrolli-inventoinnin aineistosta laskettuja kuvion puuston tunnuslukuja tarkastelujakson alussa. Kuvioiden keski- ja summatunnusten tunnusluvut ovat keskiarvo (\bar{x}), hajonta (s), minimi (x_{\min}) sekä maksimi (x_{\max}) ja kuvioiden sisäisen hajonnan keskiarvo (\bar{s}), edellisen hajonta (s_s), minimi (s_{\min}) sekä maksimi (s_{\max}).

	Kuvioiden keski- ja summatunnukset				Kuvioiden sisäinen hajonta			
	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}	\bar{s}	s_s	s_{\min}	s_{\max}
Kaikki puulajit								
PPAa	9,9	4,5	1,8	22,1	4,1	1,5	1,0	9,4
RLa	812	224	295	1449	322	129	94	725
Da	13,5	2,6	7,4	21,7	0,8	0,4	0,2	2,3
Ha	9,2	2,3	5,0	15,6	0,5	0,2	0,2	1,3
Mänty								
PPAa	7,2	3,9	1,1	20,4	3,8	1,5	0,9	8,2
RLa	531	196	144	1222	270	97	73	54
Da	14,0	3,0	7,0	21,9	1,0	0,6	0,3	4,4
Ha	9,3	2,4	5,0	15,7	0,5	0,3	0,2	1,7
Kuusi								
PPAa	2,7	1,8	0,2	7,9	1,7	1,3	0,0	6,1
RLa	217	126	64	586	139	100	0	511
Da	11,4	2,7	5,6	17,3	1,2	0,8	0,1	4,0
Ha	8,5	2,2	3,7	14,9	0,7	0,4	0,1	2,2
Lehtipuut								
PPAa	3,1	2,2	0,3	13,1	2,4	1,9	0,0	9,9
RLa	341	220	63	1076	244	183	0,0	956
Da	11,1	2,2	6,5	17,6	1,5	1,2	0,3	6,2
Ha	8,5	1,9	4,5	12,9	0,8	0,5	0,1	2,5

Tarkastelujakson alkuun ennustetun keskipituuden vaihtelualueen perusteella aineisto edusti hyvin ensiharvennusikää lähestyviä ja sen juuri saavuttaneita puustoja (taulukko 3). Koealojen keskitunnusten (keskiläpimitta ja -pituus) kuvion sisäinen hajonta oli keskimäärin alle 10 % ja summatunnusten (runkoluku ja pohjapinta-ala) hajonta oli vastaavasti n. 40 % (kuva 1). Kuvioiden sisäisen hajonnan suuruus ei riippunut kasvupaikasta eikä kuvion koosta millään tarkastellulla puustotunnuksella.

3.2 Päivytysinventoinnin virheet

Päivytysinventoinnin luotettavuutta tarkasteltiin simulointijakson alussa kontrolli-inventoinnin ja päivytysinventoinnin puustotunnusten erotusten avulla (taulukko 4). Päivytysinventoinnissa pohjapinta-ala ja runkoluku olivat keskimäärin suurempia kuin koealainventoinnin vastaavat (2 m² eli 20 %, 320 ha⁻¹ eli 40 %). Sen sijaan keskiläpimitta oli päivytysinventoinnissa keskimäärin pienempi (2,6 cm eli

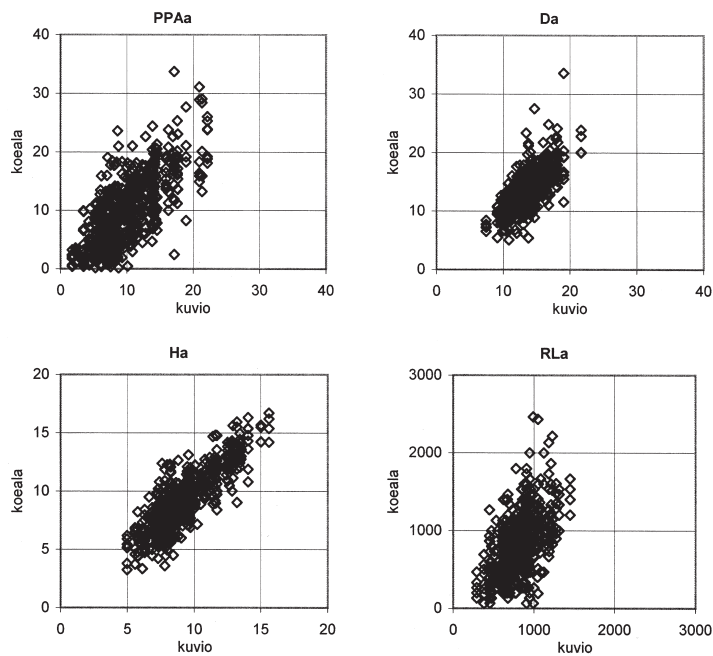
20 %). Menetelmien antamat keskipituuden arviot poikkesivat keskimäärin vain vähän toisistaan.

Systemaattisten erojen toteamiseksi tutkittiin metsikkötunnusten poikkeamien tilastollista merkitsevyyttä 5 %:n riskillä kuvioittain (kuva 2). Keskipituuden merkitsevät erot jakaantuivat positiivisiin ja negatiivisiin siten, että päivitysinventoinnissa pisimmät puustot aliarvioitiin. Sen sijaan lähes kaikki pohjapinta-alan ja runkoluvun tilastollisesti merkitsevät poikkeamat olivat yliarvioita ja keskiläpimitan poikkeamat aliarvioita.

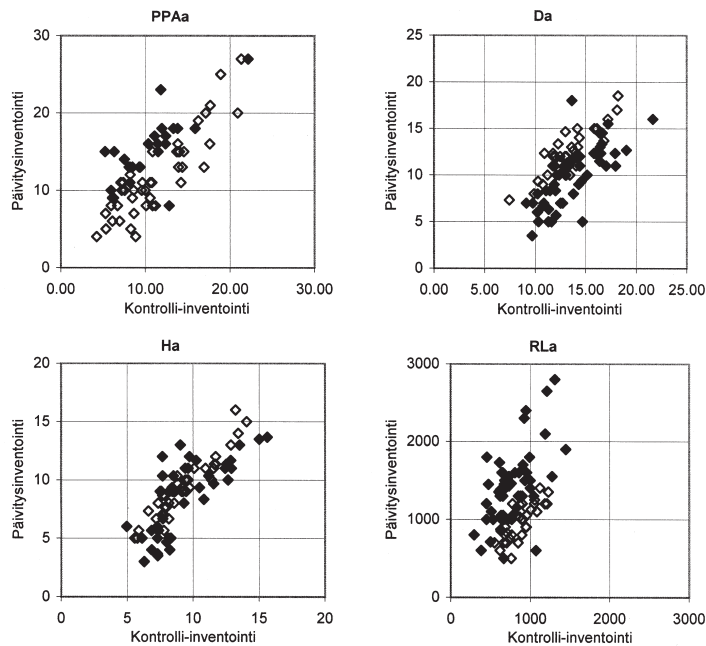
3.3 Puutason tiedon generoinnin virheet

Kuvion puutason tiedon generoinnista aiheutuvaa virhettä tarkasteltiin jakson alkuun projisoitujen kontrolli-inventoinnin tulosten avulla. Mela-ohjelmistolla ennustettuja läpimitta- ja pituusjakaumia verrattiin vastaaviin mitattuihin jakaumiin.

Mela-ohjelmistossa läpimittajakauma kalibroidaan aina annetun pohjapinta-alan mukaan, joten



Kuva 1. Pohjapinta-alan (PPAa), keskiläpimitan (Da), keskipituuden (Ha) ja runkoluvun (RLa) vaihtelu kuvion sisällä tarkastelujakson alussa. y-akselilla koealoittaiset arvot ja x-akselilla kuvioittaiset keskiarvot.



Kuva 2. Männyn pohjapinta-alan (PPAa), keskiläpimitan (Da), keskipituuden (Ha) ja runkoluvun (RLa) arviot kontrolli-inventoinnin ja päiväysinventoinnin mukaan tarkastelujakson alussa. Tilastollisesti merkitsevästi (5 %:n riski) eroavat kuviot merkitty kokomustilla vinoneliöillä.

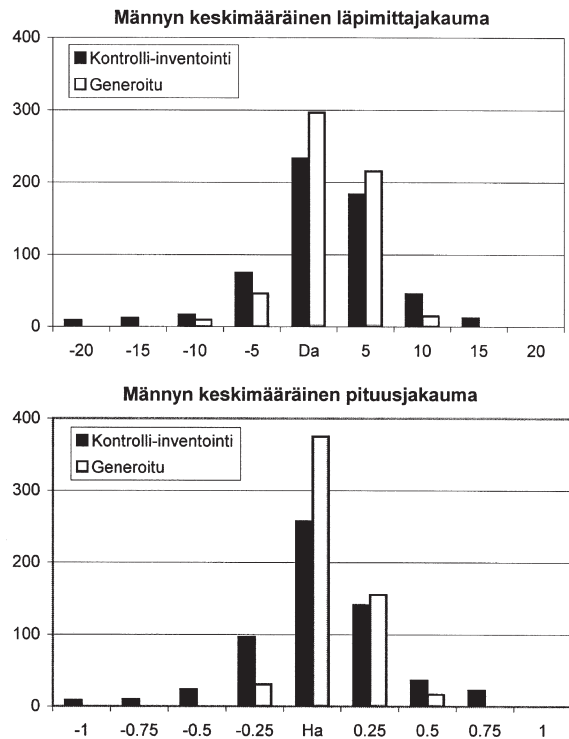
Taulukko 4. Kontrolli-inventoinnin ja päivitysinventoinnin puustotunnusten erotusten tunnuslukuja. Kuvioiden lukumäärä, joilla puustotunnus on mitattu (n), eron keskiarvo (\bar{x}), eron hajonta (s), eron minimi (x_{\min}) ja eron maksimi (x_{\max}). Puulajeittaiset muuttujat on ilmaistu alaindeksin: mänty on ma, kuusi on ku ja lehtipuu on le.

	n	\bar{x}	s	x_{\min}	x_{\max}
PPA	69	-2,0	3,3	-11,2	8,9
RL	85	-323	408	-1488	472
Dg	87	2,6	2,3	-4,6	9,0
Hg	87	0,3	1,7	-4,3	4,2
PPA _{ma}	69	-2,3	3,4	-13,6	5,7
RL _{ma}	85	-443	360	-1344	115
Dg _{ma}	87	2,0	2,5	-4,9	8,2
Hg _{ma}	87	-0,1	1,7	-4,9	3,3
PPA _{ku}	63	1,3	1,6	-1,5	6,0
RL _{ku}	75	121	130	-300	436
Dg _{ku}	55	1,8	3,3	-6,2	10,3
Hg _{ku}	55	0,4	2,6	-8,4	6,4
PPA _{le}	62	1,4	2,3	-2,5	11,1
RL _{le}	76	148	235	-538	1066
Dg _{le}	58	0,9	2,6	-4,8	10,8
Hg _{le}	58	-0,6	2,1	-5,3	5,5

Taulukko 5. Mitattujen puustotunnusten ja niiden perusteella generoidusta puujoukosta laskettujen puustotunnusten erotus tarkastelujakson alussa. x on keskiarvo ja s hajonta.

	Dg, cm		Hg, m		RL	
	\bar{x}	s	\bar{x}	s	\bar{x}	s
Mänty	-0,1	0,0	0,10	0,04	-50	110
Kuusi	-1,3	0,9	-0,41	0,60	-13	19
Lehtipuu	-0,1	0,0	0,02	0,10	-225	365

pohjapinta-aloissa ei ollut eroja. Männyllä ja lehtipuilla muutkin ennustetusta runkolukusarjasta lasketut puustotunnukset poikkesivat vain vähän mitattuun runkolukusarjaan perustuvista (taulukko 5). Sen sijaan kuusen keskiläpimitassa oli systemaattinen yli 1 cm:n yliarvio. Ennustetut läpimitan ja piteuden jakaumat olivat keskimäärin suppeampia kuin mitatut jakaumat. Samalla ne olivat hieman vinompia oikealle kuin mitatut (kuva 3).

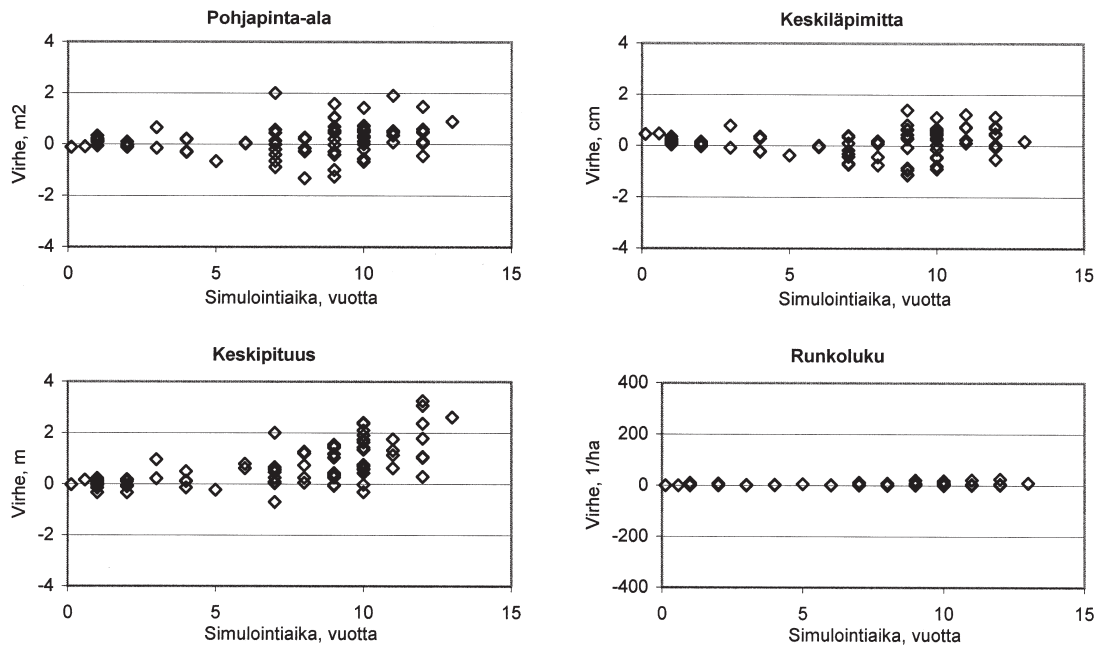


Kuva 3. Pohjapinta-alalla painotettuun keskiarvoon keskistetyt läpimitta- ja pituusjakaumat kontrolli-inventoinnissa mitatuissa puujoukoissa ja vastaavista puustotunnuksista generoiduissa puujoukoissa. Läpimitta on annettu 5 cm:n tasaavissa luokissa ja pituus 0,25 m:n tasaavissa luokissa.

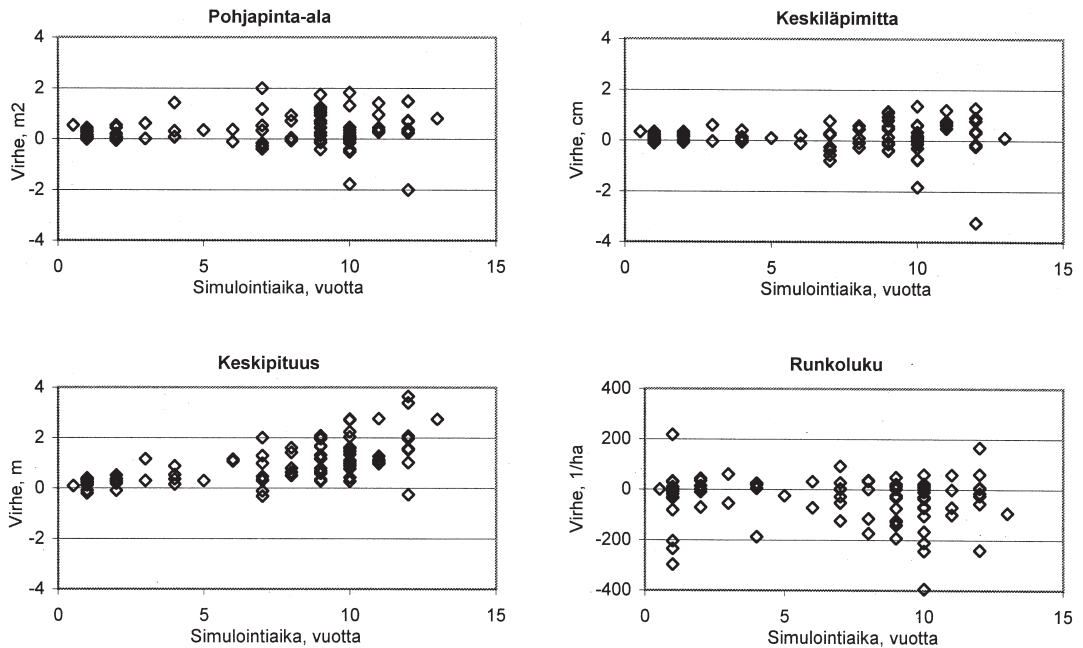
3.4 Kasvajakson lopputilan ennustaminen

3.4.1 Kasvun ennustevirhe

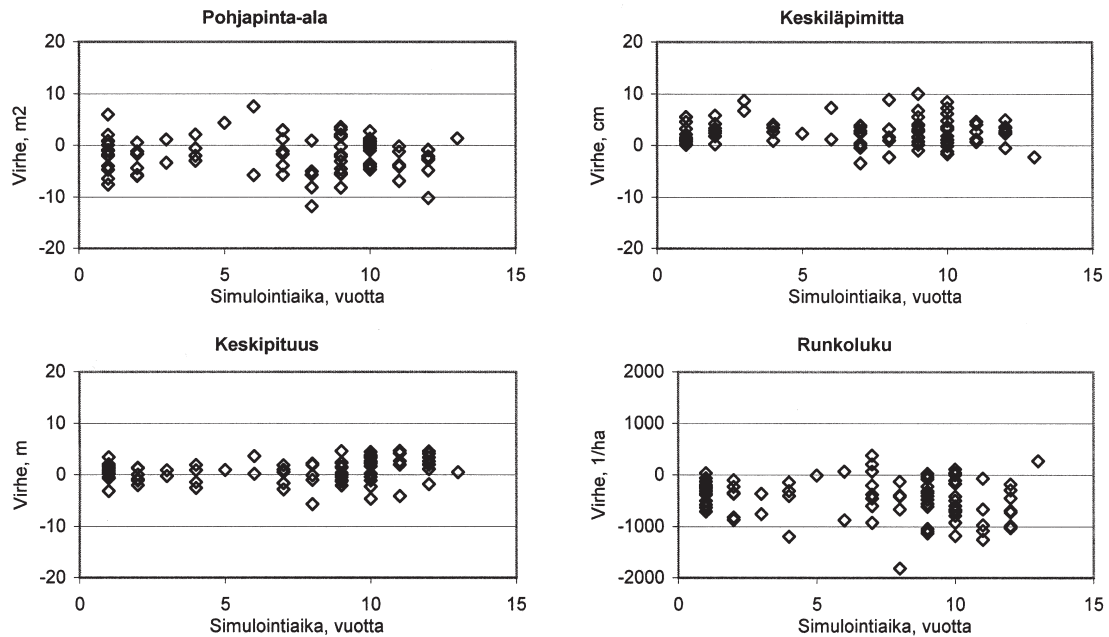
Männyllä kasvumallit aliarvioivat keskipiteuden kasvua (kuva 4). Kymmenessä vuodessa aliarvio oli keskimäärin n. 1,25 m (55 % kasvusta). Harha oli samanlainen kankailla ja soilla. Pohjapinta-alan ja läpimitan kasvujen ennusteissa ei esiintynyt selkeää systemaattista virhettä. Kasvuennusteen satunnaisen virheen hajonta kuvioiden välillä oli 10 vuoden kuluttua simuloinnin alusta pohjapinta-alassa n. 1 m², keskiläpimitassa n. 1 cm ja keskipiteudessa n. 1 m. Hajonnat olivat muilla puulajeilla saman suuruisia.



Kuva 4. Kasvun ennustamisen virhe männyn metsikkötunnuksissa simulointiajan funktiona.



Kuva 5. Kasvun ennustamisen ja puujoukon generoinnin yhteisvirhe männyn metsikkötunnuksissa simulointiajan funktiona



Kuva 6. Kasvun ennustamisen, puujoukon generoinnin ja päivitysinventoinnin yhteisvirhe männyn metsikkötunnuksissa simulointiajan funktiona.

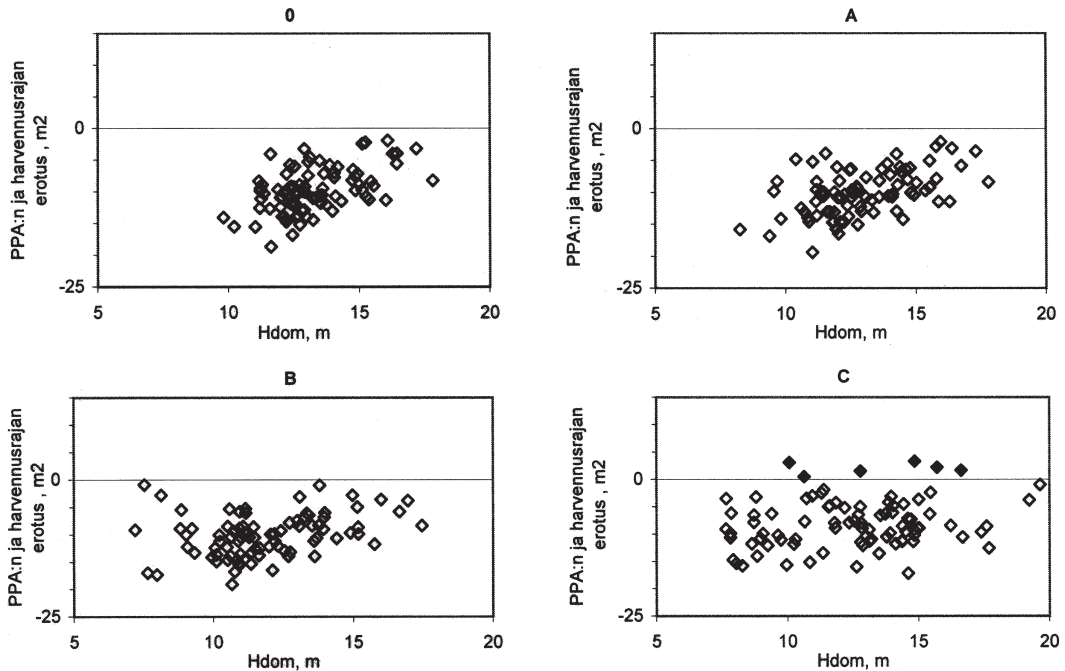
3.4.2 Puutietojen generoinnin virheiden ja kasvun ennustevirheiden kokonaisvaikutus

Männyllä pituuden ennusteen aliarvio kasvoi voimakkaasti simulointiajan pidentyessä (kuva 5). Se oli kymmenen vuoden simuloinnin jälkeen n. 1,5 m (65 % kasvusta). Myös pohjapinta-ala ja keskiläpimitta aliarvioituivat (kuva 5). Kymmenen vuoden simuloinnin jälkeen aliarvio oli pohjapinta-alassa n. 0,8 m² (35 % kasvusta) ja keskiläpimitassa vastaavasti 0,5 cm (25 % kasvusta). Tulos oli kaikilla puulajeilla hyvin samansuuntainen. Satunnaisen virheen hajonta oli 10 vuoden kuluttua simuloinnin alusta kaikissa tunnuksissa noin neljänneksen suurempi kuin pelkän kasvuennusteen aiheuttama satunnainen virrehajonta. Sekapuulajeilla hajonnat olivat hieman suurempia kuin männyllä.

3.4.3 Päivitysinventoinnin, puutietojen generoinnin sekä kasvuennusteen virheiden kokonaisvaikutus

Männyllä tarkastelujakson lopun pohjapinta-ala yliarvioitui keskimäärin n. 1,75 m² ja yliarvio oli suhteellisen riippumaton simulointiajan pituudesta (kuva 6, huomaa, että y-akselin vaihteluväli on viisinkertainen kuviin 4 ja 5 verrattuna). Yliarvio oli 115 % kymmenen vuoden keskimääräisestä kasvusta. Se oli hieman vähemmän kuin päivitysinventoinnin harha (2,0 m²). Keskiläpimitta puolestaan aliarvioitui 2,7 cm (130 % kymmenen vuoden kasvusta), joka oli hieman enemmän kuin päivitysinventoinnin harha (2,6 cm). Keskipituudessa ei ollut selkeää harhaa. Lopputilan runkoluvut yliarvioituivat saman verran kuin päivitysinventoinnissa. Muilla puulajeilla systemaattiset virheet olivat hieman suuremmat kuin männyllä.

Satunnaisen virheen hajonta oli kaikilla tunnuksilla moninkertainen verrattuna pelkän simulointivirheen aiheuttamaan hajontaan. Männyllä pohjapinta-alan virheen hajonta oli n. 5 m², keskiläpimitan n. 5 cm ja keskipituuden 2,5 m. Sekapuulajien hajonnat olivat suuremmat kuin pääpuulaji männyn.



Kuva 7. Pohjapinta-alan ja harvennusrajan erotus valtapituuden funktiona simulointijakson lopussa eri tavoin ennustetuissa tarkastelujakson lopputiloissa (katso taulukko 1) Osakuvat: 0) kontrolli-inventoinnissa mitattu lopputilan puusto, A) lopputila ennustettu kasvumalleilla, kun alkutilana oli kontrolli-inventoinnissa mitattu runkolukusarja, B) lopputila ennustettu kasvumalleilla, kun alkutilana oli kontrolli-inventoinnin puustotunnuksista Mela-ohjelmistolla generoitu runkolukusarja ja C) lopputila ennustettu kasvumalleilla, kun alkutilana oli yhtiön päivitysinventoinnin puustotunnuksista Mela-ohjelmistolla generoitu runkolukusarja. Negatiiviset erotukset merkitsevät, että kuvio on harvennusrajan alapuolella. Ensiharvennuskypsiksi arvioidut kuviot on merkitty kokomustilla vinoneliöillä.

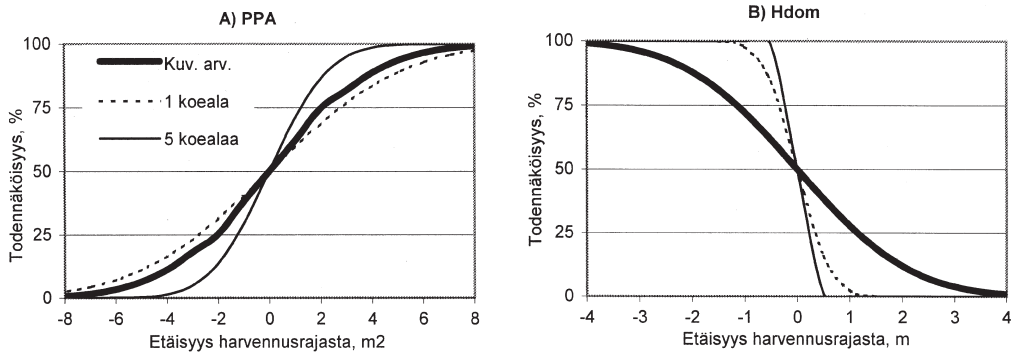
3.4.4 Ensiharvennuskypsyyden ennustaminen

Kontrolli-inventoinnin mukaan ei aineiston yksikään kuvio ollut ensiharvennuskypsä (kuva 7). Kasvun ennustevirhe ja puutunnusten generoinnista johtuva virhe eivät aiheuttaneet yhtään väärää harvennuskypsyyden arviota. Kun edellisiin virheisiin lisättiin päivitysinventoinnin virhe, niin kuusi kuvioa tulkittiin harvennuskypsiksi. Harvennusrajan ylityksiä esiintyi 10 m:n valtapituudesta alkaen. Harvennusrajan ylitysten määrä oli riippumaton simulointiajan pituudesta.

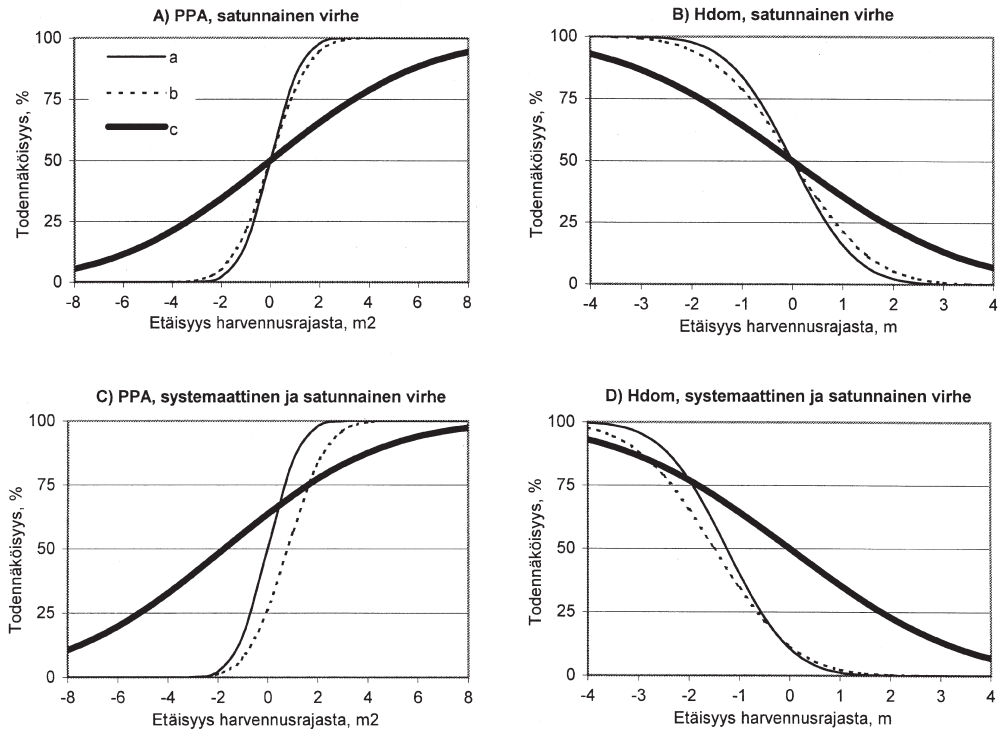
Kuvissa 8 ja 9 tarkastellaan kuvion pohjapinta-alan ja valtapituuden virheen vaikutusta harvennuskypsyyden määrittelyyn. Kuvien y-akselilla esitetään todennäköisyys sille, että kuvio määritetään harvennuskypsäksi. Kuvien x-akselilla on kuvion

todellisen pohjapinta-alan tai valtapituuden poikkeama harvennusrajasta. Mikäli puustotunnuksen arvioissa ei ole virhettä, niin harvennuskypsyyden arvion todennäköisyys on 0 % harvennusrajan alapuolella ja 100 % yläpuolella.

Kuvassa 8 esitetään satunnaisen inventointivirheen vaikutus harvennuskypsyyden määrittämiseen ilman runkolukusarjan generoinnista ja kasvun ennustamisesta johtuvaa virhettä. Tarkasteltavana on päivitysinventoinnissa käytetyn kuvioittaisen arvioinnin ja vaihtoehtoisena menetelmänä satunnaisen koelaotannan virheet. Kuvioittaisen arvioinnin satunnaisen virheen hajonnat laskettiin kontrolli-inventoinnin ja päivitysinventoinnin arvojen erotuksien avulla. Ne olivat pohjapinta-alassa 3,3 m² ja valtapituudessa 1,7 m. Satunnaisen koelaotannan otantavirhe laskettiin kuvioitten keski-



Kuva 8. Kuvion todennäköisyys tulla määritetyksi harvennuskypsäksi, kun tunnettu pohjapinta-ala ja valtipituus sisältävät inventoinnista johtuvan satunnaisvirheen. x-akselilla on todellisen pohjapinta-alan ja harvennusrajan erotus (osakuva A) tai todellisen valtipituuden ja harvennusrajaan vastaavan valtipituuden erotus (osakuva B). ”Kuv. arv.” = yhtiön maastopäivitys, ”1 koeala” = satunnainen koealaotanta yhdellä 1,5 a:n koealalla ja ”5 koealaa” = satunnainen koealaotanta viidellä 1,5 a:n koealalla.



Kuva 9. Kuvion todennäköisyys tulla määritetyksi harvennuskypsäksi 10 vuoden simuloinnin jälkeen, kun tunnettu pohjapinta-ala ja valtipituus sisältävät eri lähteistä syntyvän satunnaisvirheen (osakuvat A ja B) ja satunnaisen sekä systemaattisen virheen (osakuvat C ja D). x-akselilla on todellisen pohjapinta-alan ja harvennusrajan erotus ja todellisen valtipituuden ja harvennusrajaan vastaavan valtipituuden erotus. Vaikuttavat virhelähteet ovat taulukon I mukaiset: a) kasvun ennustevirhe, b) kasvun ennustevirhe sekä puutietojen generoinnin virhe ja c) kasvun ennustevirhe, puutietojen generoinnin virhe sekä päivitysinventoinnin virhe. Laskelmissa käytetyt virheet on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Kuvassa 9 käytetyt puustotunnusten virheet. Virheiden tunnusluvut ovat harha (b) ja hajonta (s). Virhelähteet ovat: kas = kasvun ennustaminen, gen = puujoukon generointi puustotiedoista ja inv = päivitysinventointi.

Virhelähde	PPA, m ²		Hdom, m	
	b	s	b	s
kas	0,00	1,00	1,25	1,00
kas + gen	0,80	1,25	1,50	1,25
kas + gen + inv	-1,75	5,00	0,00	2,70

määräisestä sisäisestä hajonnasta (4,1 m² ja 0,5 m), kun kuviolle sijoitettiin satunnaisesti yksi tai viisi 1,5 a:n suuruista ympyräkoealaa.

Tarkastellaan kuvan 8 avulla tilannetta, jossa kuvio ei ole harvennuskypsä. Kun kuvion todellinen pohjapinta-ala on 2,2 m² harvennusrajan alapuolella tai valtapituus 1,2 m harvennusrajan yläpuolella, määritetään kuvio 25 %:n riskillä harvennuskypsäksi. Jos kuvioittainen arviointi korvataan yhdellä satunnaisesti sijoitetulla 1,5 a:n koealalla, niin harvennuskypsyyden määrittämisen luotettavuus heikenee vain hieman. Jo kahdella koealalla saadaan sama luotettavuus kuin kuvioittaisella arvioinnilla ja viisi koealaa tuottaa selvästi luotettavamman tuloksen.

Kuvassa 9 tarkastellaan eri virhetekijöiden merkitystä, kun puuston kasvua on simuloitu 10 vuotta vaihtoehdoilla A, B ja C (taulukko 1). Käytetyt systemaattiset virheet ja virrehajonnat on annettu taulukossa 6. Mikäli pohjapinta-alassa ja valtapituudessa esiintyy vain satunnaista virhettä, niin harvennusrajalla olevan metsikön todennäköisyys tulla harvennuskypsäksi on 50 % (kuvat 9A ja B). Kun alkutilan runkolukusarja tunnetaan, määritetään kuvio harvennuskypsäksi 25 %:n riskillä, kun todellinen pohjapinta-ala on 0,7 m² harvennusrajan alapuolella tai pituus 1,7 m harvennusrajan yläpuolella. Riski johtuu kasvun ennustamisen satunnaisesta virheestä. Kun alkutilan puustotunnukset tunnetaan, niin vastaavat arvot ovat 0,9 m² ja 0,8 m. Tällöin riskiin vaikuttaa edellisen lisäksi puujoukon muodostamisesta aiheutuva satunnainen virhe. Kun alkutila kuvataan päivitysinventoinnin puustotunnuksilla, niin kuvio määritetään 25 %:n riskillä harvennuskypsäksi jo silloin, kun sen pohjapinta-ala on 3,4 m² harvennusrajan alapuolella tai valtapituus 1,9 m harvennusrajan yläpuolella. Tällöin riskiin vaikuttaa edellisten syiden lisäksi

maastopäivityksen satunnainen virhe. Se oli tässä työssä selvästi suurin syy vääriin ensiharvennuskypsyyden päättelyyn.

Pohjapinta-alan arvion systemaattisella virheellä oli vain pieni vaikutus harvennuskypsyyden määrittämisessä, jos mukana ei ollut maastopäivityksen virhettä. Maastopäivityksessä tehty pohjapinta-alan systemaattinen yliarvio aikaistaa arvioitua harvennuskypsyyden saavuttamista (kuva 9C). Pituuskasvunennusteen systemaattinen aliarvio siirtää arvioitua harvennuskypsyyden saavuttamista aikaisemmaksi (kuva 9D).

5 Tarkastelu

Aineisto edustaa ensiharvennusvaiheessa olevia männiköitä, jotka sijaitsevat UPM-Kymmene Oyj:n (yhtiön) mailla Hyrynsalmen, Paltamon, Puolangan, Ristijärven, Kajaanin, Kuhmon ja Sotkamon kunnissa. Tuloksia ei voi suoraan yleistää muihin metsikön kehitysvaiheisiin, muille maantieteellisille alueille eikä muille puulajeille. Yleistämiskelpoisuus Kainuun alueella sijaitseviin muiden maanomistajien metsiin riippuu niillä harjoitetusta metsänhoidosta verrattuna yhtiön käytäntöön. Yhtiön metsissä valtaosa männiköistä on perustettu viljelemällä ja taimikot on hoidettu. Ilmeisesti kuvioitten sisäinen hajonta on yhtiön mailla pienempi kuin Kainuussa keskimäärin.

Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa keskitunnusten erilainen määrittäminen päivitys- ja kontrollinventoinneissa, kontrolli-inventoinnin otanta- ja mittausvirheet sekä mallivirheet koepuutietojen yleistämisessä lukupuille ja puutietojen projisoinnissa tarkastelujakson alkuun.

Merkittävin virhemahdollisuus on pituuskasvun mittauksessa, joka saatiin kahden pituushavainnon erotuksena. Jakson alun pituus määritettiin oksakiehkuroiden avulla. Pituuskasvun mittausta käsittelevissä tutkimuksissa on yleensä tarkasteltu asteikollisella kiikarilla tehtyjä mittauksia (Alalammi 1968, Päivinen ym. 1992 ja Tiihonen 1967). Kaikissa näissä tutkimuksissa pituuskasvu yliarvioitiin 20–30 %. Mikäli tehdyssä pituuskasvumittauksessa olisi tapahtunut samanlainen suhteellinen systemaattinen yliarvio, niin silloin päivitysinventoinnin ja

samaan ajankohtaan projisoidun kontrolli-inventoinnin tulosten välinen keskipituusero korreloisi tarkastelujakson pituuden kanssa. Tällaista korrelaatiota ei kuitenkaan esiintynyt, joten kontrolli-inventoinnin pituuskasvun mittauksessa ei liene merkittävää systemaattista virhettä.

Koealoitannasta johtuva satunnainen virhe vaihteli kuvioittain riippuen kuvion tasaisuudesta ja koealojen määrästä. Puustotunnusten keskivirhe oli joillakin kuvioilla varsin suuri, joten yksittäisiä kuvioita koskevissa tiedoissa voi esiintyä merkittävää epävarmuutta.

Kontrolli-inventoinnin aineistossa oli kolme hierarkista tasoa: kuvio, koeala ja puu. Aineiston esikäsittelyssä kokeiltiin sekamalleja, joiden satunnaisosassa erotettiin kaikki kolme tasoa. Useimmista malleissa kuviotaso ei kuitenkaan osoittautunut tilastollisesti merkitseväksi ja se jätettiin lopullisista malleista pois. Sekamallien koealoittaisella kalibroinnilla yhdistettiin tehokkaasti koko aineistosta saatu puutunnusten välisen riippuvuuden yleinen muoto ja yksittäiseltä koealalta mitattujen harvojen koepuiden informaatio.

Kontrolli-inventoinnin perusteella laskettujen puustotunnusten ja päivytysinventoinnin puustotunnusten erotuksien avulla voidaan arvioida päivytysinventoinnin luotettavuutta. Erotuksen satunnainen hajonta oli kaikilla tarkastelluilla puustotunnuksilla samaa suuruusluokkaa kuin aiemmissa tutkimuksissa todettu kuvioittaisen arvioinnin satunnaisen virheen hajonta (Laasasenaho ja Päivinen 1986, Mähönen 1984, Pigg 1994 ja Purola 1983). Myös havaitut systemaattiset erot pohjapinta-alassa, keskipituudessa ja runkoluvussa sopivat aiempien tutkimusten vaihtelualueelle. Sen sijaan systemaattinen ero keskiläpimitassa oli selvästi suurempi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa todettu harha. Keskiläpimitan systemaattiseen virheeseen saattaa sisältyä määrittymenettelmien eroista johtuvaa harhaa.

Tehty tarkastelu voi aliarvioida päivytysinventoinnin luotettavuutta, koska siihen vaikuttavat otantavirhe, simulointijakson alkutilan projisoinnissa syntyneet mallivirheet ja maastopäivityksen ja koealainventoinnin erot keskitunnusten määrittämisessä. Koska tulokset olivat keskiläpimitaa lukuun ottamatta hyvin saman suuntaisia aikaisempien tutkimusten kanssa, niin taulukossa 3 esitetyt luvut kuvannevat suhteellisen hyvin yhtiön maastopäivi-

tyksen luotettavuutta. Keskiläpimitan systemaattinen virhe voi kuitenkin olla yliarvio.

Ensiharvennustarve määritettiin pohjapinta-alan ja valtapituuden avulla. Valtapituus ennustettiin aineistossa pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden avulla lisäämällä siihen vakio. Käytetty vakio oli valtapituuden ja keskipituuden erotusten keskiarvo Metlan ensiharvennuksen ajankohtaa tutkivassa kestokoesarjassa. Harvennusalustoissa yhden metrin lisäys valtapituudessa nosti harvennusrajaa 0,45–0,55 m² alle 18 m:n valtapituuksilla. Varttuneemmillä kuvioilla pituuden vaikutus oli pienempi. Vaikka oletettaisiin, että valtapituuden virheen hajonta olisi tämän tutkimuksen aineistossa kaksinkertainen verrattuna kestokoesarjasta mitattuun, aiheuttaa valtapituuden laskentatapa alle 1 m²:n satunnaisvirheen harvennuskypsyyden määrittelyssä.

Kuvioiden sisäistä rakennetta tarkasteltiin kontrolli-inventoinnin avulla. Koealojen keskitunnusten pienehköt suhteelliset hajonnat kuvioiden sisällä osoittavat puuston kehitysvaiheen vaihtelevan vain vähän kuvion sisällä. Sen sijaan summattunusten huomattavasti suuremmat suhteelliset hajonnat aiheutuvat mm. aukkoisuudesta, ajourista ja ojista. Kuvioiden sisäistä vaihtelua kuvaavien tunnuslukujen tulkinnassa ja vertaamisessa muihin tutkimuksiin on otettava huomioon, että vaihtelu riippuu koealakoosta (esim. Nyssönen ym. 1967, Lappi 1991).

Puustotunnuksista generoitujen puutietojen avulla lasketut uudet puustotunnukset olivat lähes harhattomia. Ainoastaan kuusen keskiläpimitassa syntyi n. 1 cm:n yliarvio. Generoidut läpimita- ja pituusjakaumat olivat suppeampia ja vinompia oikealle kuin alkuperäiset jakaumat. Harha läpimitajakaumien muodossa aiheutti aliarvion läpimitan ja pohjapinta-alan kehitysenusteisiin. Puutunnusten generoinnin virheet lisäsivät hieman keskipituuden kasvun aliarviota.

Kuvioittaiseen arviointiin perustuvan päivytysinventoinnin epätarkkuus oli selkeästi suurin yksittäinen epävarmuuden aiheuttaja puustotunnusten ja ensiharvennuskypsyyden määrittämisessä. Päivytysinventoinnin virhe siirtyi tehdyissä lyhyissä simuloinneissa lähes sellaisenaan tarkastelujakson lopputilan puustotunnuksiin. Merkittävää on, että pelkkä satunnainen virhe aiheutti ensiharvennuskypsyyden yliarvion.

Toinen merkittävä virhelähde oli pituuskasvunusteen aliarvio, joka johtaa kasvavaan harvennustarpeen yliarviointiin simulointiajan pidentyessä. Pituuskasvun aliarvio oli samansuuruinen kankailla ja soilla, vaikka pituuskasvumallit perustuvat näillä kasvupaikoilla erilaisiin lähestymistapoihin (Hynynen ym. 2002).

Vaikka tulokset koskevat sellaisenaan vain Mela-ohjelmistoa ja yhtiön ensiharvennuskannikoita Kainuussa, voidaan tehdyn tarkastelun avulla arvioida yleisemminkin eri virhelähteiden vaikutusta harvennuskypsytyden määrittämiseen. Inventointi, puutietojen generointi ja kasvun ennustaminen voivat kukin aiheuttaa merkittävää epävarmuutta ensiharvennuskypsytyden määrittämisessä. Jo pelkkä satunnainen virhe aiheuttaa harhaa. Näiden virhelähteiden, erityisesti inventoinnin, merkitys on suuri ensiharvennusvaiheen kuvioilla. Puustotunnusten arvioinnin suhteellinen luotettavuus on huonompi kuin varttuneissa metsissä, koska erityisesti puuston summatunnusten (PPA ja RL) spatiaalinen vaihtelu kuvion sisällä voi olla suuri. Pienetkin virheet taimikkovaiheen metsän kuvauksessa aiheuttavat kumuloituvan virheen koko metsikön kehitykseen. Kumuloituminen tapahtuu suhteellisesti nopeimmin juuri nuorissa metsissä.

Metsäalueella systemaattinen pohjapinta-alan yliarvio aiheuttaa harvennustarpeen yliarvion. Myös valtapituuden aliarvio vaikuttaa samaan suuntaan. Satunnaisen virheen vaikutus metsäalueen harvennuspoistuman ennusteeseen riippuu pohjapinta-alan ja valtapituuden todellisten arvojen jakaumasta. Lyhyellä aikavälillä satunnainen virhe aiheuttaa harvennustarpeen yliarvion, koska hoidetulla metsäalueella kuvioiden enemmistö on harvennusrajan alapuolella (kuva 8a ja b).

Kiitokset

Käsitteilytyön ensimmäisen version ovat luke- neet MMT Helena Henttonen, prof. Jari Hynynen ja MML Jouni Siipilehto. Heidän antamaansa palautetta on käytetty käsitteilytyöstä edelleen työs- tettäessä. Julkaisusarjan määräämien esitarkastajien MMM Pentti Niemistön ja prof. Risto Päivisen tekemillä parannusehdotuksilla on ollut suuri vaikutus

tutkimuksen lopulliseen esitysmuotoon. Lämpimät kiitokset kaikille edellä mainituille.

Kirjallisuus

- Alalammi, E. 1968. Puun pituuskasvun arvioimistarkkuudesta ja sen vaikutuksesta kasvun arvioon. Metsänarvioimistieteen laudaturtyö metsätutkintoa varten. Metsänarvioimistieteen laitos [nyk. Metsävarojen käytön laitos]. Helsingin yliopisto. 43 s. + liitteet.
- Fuller, W.A. 1987. Measurement error models. John Wiley & Sons. New York. 440 s.
- Harvennushakkuut Uudistuskypsyys, 1998. UPM-Kymmene Metsä. 47 s.
- Hynynen, J. & Arola, M. 1999. Ensiharvennusajankohdan vaikutus hoidetun männikön kehitykseen ja harvennuksen kannattavuuteen. Metsätieteen aikakauskirja 1999(1): 5–23.
- , Ojansuu, R., Hökkä, H., Salminen, H., Siipilehto, J. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 110 s. + liitteet.
- Kangas, A. 1996. On the bias and variance in the volume predictions due to model and measurement errors. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11: 281–290.
- 1997. On the prediction bias and variance of long-term growth predictions. *Forest Ecology and Management* 96: 207–216.
- 1998. Effect of errors-in-variables on coefficients of a growth model and on prediction of growth. *Forest Ecology and Management* 102: 203–212.
- & Kangas, J. 1997. Mallit, ennusteet ja simulointi metsätalouden laskentajärjestelmissä. Metsätieteen aikakauskirja 3/1997: 389–404.
- Kilkki, P. 1979. Outline for data processing system in forest mensuration. Seloste: Ehdotus metsänmittaustulosten laskentamenetelmäksi. *Silva Fennica* 13(4): 368–384.
- , Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R. 1989. Use of the Weibull function in estimating the basal area dbh-distribution. Tiivistelmä: Weibull-funktion käyttö pohjapinta-alan läpimittajakauman estimoinnissa. *Silva Fennica* 23: 311–318.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Lappi, J. 1991. Estimating the distribution of a variable measured with error: stand densities in a forest inventory. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 469–473.
- 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.

- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W. & Wolfinger, R.D. 1996. SAS® System for mixed models. Cary, NC: SAS Institute Inc. 633 s.
- Mykkänen, R. 1986. Weibull-funktion käyttö läpimittajakauman estimoinnissa. Metsätalouden syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopiston metsätieteellisen tdk:n opinnäytteitä. 80 s.
- Mähönen, M. 1984. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. Pro gradu -työ. Metsänarvioimistieteen laitos [nyk. Metsävarojen käytön laitos]. Helsingin yliopisto. 55 s. + liitteet.
- Nyysönen, A., Kilkki, P. & Mikkola, E. 1967. On the precision of some methods of forest inventory. Seloste: Eräiden metsänarvioimismenetelmien tarkkuudesta. Acta Forestalia Fennica 81(4). 60 s.
- Näslund, M. 1936. Skogsföranstaltens gallringsförsök i tallskog. Promärbearbetning. Medd. Stat. Skogsförs. Anst. 29(1). 170 s.
- Pigg, J. 1994. Keskiläpimitan ja puutavaralajijakauman sekä muiden puustotunnusten tarkkuus Metsähallituksen kuvioittaisessa arvioinnissa. Pro gradu -työ. Metsänarvioimistieteen laitos [nyk. Metsävarojen käytön laitos]. Helsingin yliopisto. 86 s.
- Purola, M. 1983. Silmävaraisen arvioinnin tarkkuus metsätaitokilpailussa. Pro gradu -työ. Metsänarvioimistieteen laitos [nyk. Metsävarojen käytön laitos]. Helsingin yliopisto. 94 s. + liitteet.
- Päivinen, R. 1980. Puiden läpimittajakauman estimointi ja siihen perustuva puustotunnusten laskenta. Folia Forestalia 442. 42 s.
- , Nousiainen, M. & Korhonen, K.T. 1992. Puutunnusten mittaamisen luotettavuus. Folia Forestalia 787. 18 s.
- Searle, S.R. 1971. Linear models. John Wiley, New York. 532 s.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Hirvelä, H., Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996. Mela handbook. 1996 edition. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 622. 452 s.
- Stage, A.R. & Wykoff, W.R. 1998. Adapting distance-independent forest growth models to represent spatial variability: effects of sampling design on model coefficients. 44: 224–238.
- Tiihonen, P. 1967. Pituuskasvun arvioimisesta. Metsätaloudellinen aikakauslehti 5–6: 190–191.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männylle, kuuselle ja koivulle. Pro gradu -työ. Metsänarvioimistieteen laitos [nyk. Metsävarojen käytön laitos]. Helsingin yliopisto. 60 s. + liitteet.

28 viitettä

Symbolit

Puutunnukset

- b2 kuoren kaksinkertainen paksuus, cm
 d kuorellinen rinnankorkeusläpimitta tarkastelujakson lopussa, cm
 dw kuoreton rinnankorkeusläpimitta tarkastelujakson lopussa, cm
 h pituus tarkastelujakson lopussa, m
 idw kuoreton läpimitan kasvu, cm
 ih pituuskasvu, m

Puustotunnukset

- D pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta tarkastelujakson lopussa, cm
 Da pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta tarkastelujakson alussa, cm
 H pohjapinta-alalla painotettu keskipituus tarkastelujakson lopussa, m
 Ha pohjapinta-alalla painotettu keskipituus tarkastelujakson alussa, m
 Hdom valtapituus, m
 PPA pohjapinta-ala tarkastelujakson lopussa, m²/ha
 PPAa pohjapinta-ala tarkastelujakson alussa, m²/ha
 RL runkoluku tarkastelujakson lopussa, kpl/ha
 RLa runkoluku tarkastelujakson alussa, kpl/ha

Muut

- a_x mallin kiinteä parametri, vakio x = 0, kerroin x = 1 tai 2
 e mallin satunnainen puutason virhe
 i puuta osoittava alaindeksi
 k kuviota osoittava alaindeksi
 t vuotta osoittava alaindeksi
 T maastopäivitysvuosi
 v_x mallin satunnainen koelatasen parametri, vakio x = 0, kerroin x = 1 tai 2