



Mikko Vastaranta



Risto Ojansuu



Markus Holopainen

Mikko Vastaranta, Risto Ojansuu ja Markus Holopainen

Puustotunnusten laskennallisen ajantasaistuksen luotettavuus – tapaustutkimus Pohjois-Savossa

Vastaranta, M., Ojansuu, R. & Holopainen, M. 2010. Puustotunnusten laskennallisen ajantasaistuksen luotettavuus – tapaustutkimus Pohjois-Savossa. Metsätieteen aikakauskirja 4/2010: 367–381.

Tutkimuksessa tarkasteltiin puustotunnusten ajantasaistuksen luotettavuutta ja virhelähteitä. Virhelähteet olivat kuvioittainen arviointi, kuviota kuvaavan puujoukon generointi puustotunnuksista ja kasvun ennustaminen. Aineistona oli 84 kuviota neljästä eri metsikkötyypistä Pohjois-Savon metsäkeskuksen Kerkonjoensuun suunnittelualueelta. Tutkimus pohjautui systemaattiseen koealaotantaan, jonka avulla muodostettiin tarkat puu- ja puustotason kontrollitunnukset tarkastelujakson (1–7 vuotta) alkuun sekä loppuun. Lisäksi lähtötietoina olivat käytössä tarkastelujakson alkutilan kuvioittaisella arvioinnilla kerätyt puustotunnukset. Puujoukon muodostaminen puustotason lähtötiedoista ja kasvun simulointi tarkastelujakson loppuun tehtiin Motti-metsikkösimulaattorilla. Tutkituista virhelähteistä vähiten vaikutusta oli puutason tiedon generoinnilla. Kasvun ennustevirhe aiheutti aliarviota $1,3 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ ja $1,6 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ kuusiositteiden pohjapinta-aloihin ja $0,8 \text{ m}$ ja $1,0 \text{ m}$ mäntyositteiden keskipituuksiin. Kasvuennusteen ja puutason tiedon generoinnin yhteisvirhe tuotti $0,2\text{--}0,8 \text{ cm}$ aliarvion ositteiden keskiläpimittaan ja $1,4 \text{ m}$ ja $1,5 \text{ m}$ aliarviot mäntyositteiden keskipituuksiin. Kuvioittaisen arvioinnin, puutason tiedon generoinnin ja kasvuennusteen yhteisvirhe aiheutti yliarvioita runkolukuihin $427\text{--}834 \text{ ha}^{-1}$ ja mäntyositteiden pohjapinta-aloihin $1,9 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ ja $2,8 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$. Keskiläpimitta ja -pituus aliarvioitui kaikissa ositteissa. Aliarviot vaihtelivat keskiläpimitassa $3,4\text{--}6,6 \text{ cm}$ ja keskipituudessa $0,0\text{--}3,2 \text{ m}$. Tutkimuksen tarkastelujaksolla kuvioittaisen arvioinnin virheet olivat suurin epävarmuuden aiheuttaja ajantasaistetuissa puustotunnuksissa.

Asiasanat: Kuvioittainen arviointi, metsäsuunnittelu, virhelähteet

Yhteystiedot: Vastaranta & Holopainen: Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos, Helsinki;

Ojansuu, Metla, Vantaan tutkimuskeskus, Vantaa

Sähköposti mikko.vastaranta@helsinki.fi

Hyväksytty 23.11.2010

Saatavissa <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff10/ff104367.pdf>

I Johdanto

Suomessa tiedot metsäsuunnittelun lähtöaineistoksi kerätään toistaiseksi kuvioittaisella arvioinnilla. Kerättyjen puustotunnusten varassa simuloidaan tilan metsiköiden kehitys ja lasketaan hakkuukertymät, sekä suoritetaan hakkuulaskelmat metsänhoitosuosituksen ja metsänomistajan tavoitteiden mukaisesti. Metsävaratietojen laskennallinen ajantasaistus mahdollistaa ajantasaisen metsävaratiedon saamisen suunnittelukauden väli vuosille ilman kallista uudelleen inventointia. Kustannusten alenemista tärkeämpää olisi tiedon laadun mahdollinen paraneminen jatkuvan ajantasaistamisen myötä (Hyvönen ja Korhonen 2003). Laskennallisesti ajantasaistettujen metsävaratietojen luotettavuus riippuu suoraan lähtötietojen ja ajantasaistuksessa käytettävien metsäsuunnittelun laskentajärjestelmien luotettavuudesta. Ajantasaistusjärjestelmän heikoimmat kohdat paljolti määräävät lopulta tuloksien laadun ja luotettavuuden. Laskennallisen ajantasaistuksen käyttö asettaa entistä tiukempia tarkkuusvaatimuksia lähtötiedoille ja myös ajantasaistusjaksojen pidentyessä käytettäville laskentajärjestelmille (esim. Holopainen ym. 2010a)

Laskennallisesti ajantasaistettuun tietoon liittyy aina epävarmuutta. Puutason malleihin perustuvien laskentajärjestelmien alkutiedot sisältävät inventoinnin virheen ja muuntovirheen, joka johtuu puustotason inventointitietojen muuntamisesta laskentajärjestelmän käyttämiin puutason tietoihin. Inventoinninvirhe sisältää otantavirheen, mittausvirheen, arviointivirheen (kuvioittainen arviointi) ja tulosten laskennassa käytettyjen mallien virheen (Ojansuu ym. 2002). Mittaus- ja mallivirheet voivat sisältää myös systemaattista virhettä. Inventointitietojen laskennassa, tietojen muuntamisessa puutasolle ja kasvun simuloinnissa käytetään malleja. Mallien käyttö aiheuttaa aina virhettä tuloksiin. Mallien luotettavuus kuvataan yleensä keskimäärin aineistossa ja se voi olla paljon huonompi sovellusalueen äärirajoilla (kts. esim. Välimäki ja Kangas 2009). Yksittäisen mallin aiheuttama epävarmuus johtuu yksin mallin ominaisuuksista, kun useita malleja sisältävän monimutkaisen laskentajärjestelmän epävarmuus muodostuu sen sisältämien mallien virheistä ja niiden yhteisvaikutuksista. Laskentajärjestelmän tuottami-

en ennusteiden virheille on vaikea antaa ennustetta, koska ne koostuvat useasta eri virhelähteestä (Haara ja Leskinen 2009).

Ajantasaistettua tietoa käytetään usein ottamatta huomioon sen mahdollisesti sisältämiä epävarmuustekijöitä (Haara 2002). Ojansuu ym. (2002) selvittivät maastomittausten ja kasvumallien tarkkuuden vaikutusta Mela-ohjelmistolla laskettujen hakkuuehdotusten oikeellisuuteen. Haara ja Korhonen (2004) ovat tutkineet virhelähteiden vaikutusta toimenpide-ehdotuksiin laskennallisesti ajantasaistetussa kuvioaineistossa. Edellä mainituissa tutkimuksissa mittausvirheet lähtöaineistossa ovat olleet suurin epävarmuuden aiheuttaja. Hyvönen ja Korhonen (2003) tutkivat lyhyen aikavälin (5–6 vuotta) ajantasaistetun metsävaratiedon luotettavuutta verrattuna uuteen kuvioittaisella arvioinnilla kerättyyn tietoon ja havaitsivat näiden tietojen olevan yhtä luotettavia.

Suomen metsäorganisaatioissa ollaan parhailaan ottamassa käyttöön yksityiskohtaiseen kaukokartoitukseen perustuvia inventointimenetelmiä, minkä myötä myös metsäsuunnittelussa käytettäviä laskentajärjestelmiä joudutaan kehittämään. Metsäsuunnittelussa ollaan siirtymässä puustoinventoinnin osalta harvapulssiseen laserkeilaukseen (Airborne Laser Scanning, ALS), aluepohjaiseen piirteiden irrotukseen ja ei parametriseen – estimointiin perustuvaan inventointimenetelmään (Maltamo ym. 2006). ALS-inventoinnin tuottamat puustotunnukset ovat kuitenkin kuvioittaisen arvioinnin mukaista puulaji- ja puusto-ositteista tietoa. ALS-inventointi vaatii myös tuekseen maastomittauksia. Niinpä metsäsuunnittelulaskentaan ja metsävaratiedon ajantasaistukseen liittyvien epävarmuuden lähteiden tiedostaminen ja huomioiminen on edelleen tärkeää ja ajankohtaista.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri virhelähteiden merkitystä puustotunnusten laskennallisessa ajantasaistuksessa. Tutkittavia virhelähteitä olivat kuvioittainen arviointi, puutason tiedon generointi ja kasvun ennustaminen. Käytetty menetelmä on pääpiirteissään sama kuin Ojansuun ym. (2002) käyttämä.

2 Aineisto

Tutkimusalue oli Pohjois-Savon metsäkeskuksen alueella Rautalammin kunnassa sijaitseva Kerkonjoensuun suunnittelualue. Alueen kokonaispinta-ala on n. 3000 ha. Kerkonjoensuu rajautuu lähes kokonaisuudessaan vesistöihin ja alueen metsät ovat yleensä yksityisomistuksessa. Kuvioittainen arviointi oli tehty alueella vuosina 1998–2000.

Kontrolli-inventoinnissa kerättiin syksyllä 2005 84 kuviota sisältävä aineisto, jonka avulla kuvioiden puustotunnusten kehitys voitiin kuvata luotettavasti edellisestä kuvioittaisen arvioinnin maastointoventoinnista kontrollivuoteen. Inventoinnin otanta tehtiin kuvioittaisen arvioinnin tietojen perusteella ja sitä pyrittiin keskittämään kyseisen alueen metsätaloudellisesti merkittävimpiin metsikkötyyppeihin ja ensiharvennusvaiheen metsiköihin (taulukko 1). Ensiharvennusvaiheen metsiköitä valittiin tarkasteluun erityisesti, sillä toimenpiteen ajoitus on metsänhoidollisesti tärkeä.

Tutkimuksen kuviolle tehtiin systemaattinen koealaotanta, jossa yhdellä kuviolla sijaitsi 5–10 koealaa. Koealan säteenä käytettiin ensiharvennusositteissa 5,64 m ja varttuneemmissa kuusikoissa 6,91 m. Koealoilta määritettiin kuvion yleistunnukset: pääryhmä, alaryhmä, kasvupaikkaluokka, kuivastutilanne ja pääpuulaji. Koealalla lukupuita olivat kaikki koealan puut, jotka ylittivät puolet koealan valtapituudesta. Lukupuista määritettiin puulaji, rinnankorkeusläpimitta ja kaadetuista puista kantoläpimitta. Joka viides puu oli koepuu, josta mitattiin pituus, latvusrajan korkeus, läpimitan kasvu, pituuskasvu ja kuoren paksuus. Puun pituus ja pituuskasvu mitattiin Vertex-pituudenmittauslaitteella (Haglöf Sweden AB, Långsele, Ruotsi). Pituuskasvu määritettiin havupuista kontrolli-inventointihetken ja kuvioittaisen inventointihetken pituuksien erotuk-

kena. Jälkimmäinen saatiin laskemalla oksakiehkuroista latvasta alaspäin kuvioittaisen arvioinnin toteuttamisvuoteen asti, jota vastaava pituus mitattiin. Kuusikko-ositteissa ongelma oli, että koko jakson pituuskasvua ei voitu luotettavasti erottaa kaikista metsiköiden koepuista (Sytä mm. metsikön tiheys, latvuksien tuuheus, välioksat, jne.). Koko tarkastelujakson kasvu saatiin mitattua vain 176:sta koepuusta. Siksi kuusikko-ositteen puista (341 puuta) mitattiin myös kahden vuoden pituuskasvu aina silloin, kun se oli mahdollista.

3 Menetelmät

3.1 Puustotunnusten laskenta metsiköille

Aineisto kerättiin siten, että simuloinnin, kuviotietojen ja puujoukon generoinnin virheet pystytään selvittämään. Tutkimuksessa vertailtiin kuviotasolla eritasoisista lähtötiedoista laskennallisesti ajantasaistettuja puustotunnuksia koealaotannalla objektiivisesti mitattuihin kontrollipuustotunnuksiin. Kuvioiden puustot kuvattiin tarkastelujakson alussa ja lopussa seuraavilla kuviokohtaisilla ja puulajeittaisilla tunnuksilla: runkoluku (N), pohjapinta-ala (G), pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (DGM) ja pohjapinta-alalla painotettu keskipituus (HGM). Tarkastelujakson alkutilana käytettiin kuvioittaisen arvioinnin inventointivuotta. Tarkastelujakson lopputila oli joko kontrolli-inventointivuosi tai kuvion harvennusvuosi, mikäli kuviolla oli tehty harvennus kuvioittaisen arvioinnin toteuttamisvuoden ja kontrolli-inventointivuoden välillä. Harvennettuja kuvioita oli yhteensä 17 (Ositteittain 5, 7, 2 ja 3).

Kontrolli-inventoinnin avulla muodostettiin koko tutkimuksen vertailukohdaksi puu- ja puustotunnusten kontrollit tarkastelujakson alku- ja lopputilaan. Kontrollipuustotunnukset laskettiin koealoilta mitattujen puiden avulla. Lukupuiden puuttuvat tunnuksat ennustettiin koepuista estimoitujen lineaaristen sekamallien avulla. Sekamallit laadittiin jokaisessa ositteessa erikseen puun pituudelle, kuoren paksuudelle, pituuskasvulle ja menneelle läpimitan kasvulle. Sekamallien parametrit estimoitiin ja koealoittaiset satunnaisvaikutukset ennustettiin SAS-ohjelmiston Mixed-proseduurilla (Littell ym. 1996). Mallit on

Taulukko 1. Kontrolli-inventoinnin ositteet.

Osite	n
1	22 Ensiharvennumänniköt kuivahkoilla kankailla
2	19 Ensiharvennumänniköt puolukkaturvekankailla
3	21 Ensiharvennuskuusikot lehtomaisilla kankailla
4	22 Varttuneet kuusikot lehtomaisilla kankailla

esitelty kaavoissa (1–8). Jokaisen ositteen erillisessä laskennassa käytetyt mallien parametrit ja niiden estimaatit on erikseen esitelty liitteessä I. Malleissa a:t ovat kiinteitä parametrejä, v:t satunnaisia parametrejä ja e:t puukohtaisia satunnaisvirheitä.

Lukupuiden ja harvennuksessa poistettujen puiden pituuksien ennustamisessa kontrolli-inventointivuoteen käytettiin Näslundin pituuskäyrää (Näslund 1936). Linearisoitu pituuskäyrä kuvattiin sekamallilla:

$$(h_{ki} - 1,3)^{-0,5} = a_{h0} + a_{h1}ku + a_{h2}le + a_{h3}d_{ki}^{-1} + v_{h0k} + v_{h1k}d_{ki}^{-1} + e_{h0ki} \quad (1)$$

missä d_{ki} on puun i kuorellinen läpimitta koelalalla k , h_{ki} on vastaavan puun pituus. Puulajeittaiset valemuuttujat ovat ma , ku ja le (ma =mänty, ku =kuusi, le =lehti). Alaindeksi h mallin parametreissa viittaa pituusmalliin. Pituusmallin epälineaarista muunnoksesta johtuva harha korjattiin koepuiden avulla. Harhan suuruus ei riippunut puun läpimitasta.

Kuoren kaksinkertaisen paksuuden malli kuorellisen läpimitan funktiona oli muotoa:

$$b2_{ki} = a_{b0} + a_{b1}ma + a_{b2}ku + a_{b3}le + a_{b4}d_{ki} + a_{b5}d_{ki}ma + a_{b6}d_{ki}ku + a_{b7}d_{ki}le + v_{b0k} + v_{b1k}d_{ki} + e_{b0ki} \quad (2)$$

jossa selittäjänä on kuorellinen läpimitta ja alaindeksi b viittaa kuorimalliin. Kuorettoman läpimitan funktiona malli oli:

$$b2_{ki} = a_{bw0} + a_{bw1}ma + a_{bw2}ku + a_{bw3}le + a_{bw4}dw_{ki} + a_{bw5}dw_{ki}ma + a_{bw6}dw_{ki}ku + a_{bw7}dw_{ki}le + v_{bw0k} + v_{bw1k}dw_{ki} + e_{bw0ki} \quad (3)$$

jossa selittäjänä on kuoreton läpimitta (dw) ja alaindeksi bw mallin parametreissa viittaa kuorimalliin.

Kuorettomat läpimitat tarkastelujakson alkuun ja harvennusvuoteen laskettiin vähentämällä mallilla 3 lasketusta kuorettomasta läpimitasta vuosittaiset kuorettoman läpimitan kasvut (idw). Menneen vuotuisen kasvun ennustaminen tapahtui seuraavalla mallilla:

$$idw_{ki} = a_{dw0} + a_{dw1}ma + a_{dw2}ku + a_{dw3}le + a_{dw4}dw_{ki} + a_{dw5}dw_{ki}ma + a_{dw6}dw_{ki}ku + a_{dw7}dw_{ki}le + a_{dw8}t04 + a_{dw9}t03 + a_{dw10}t02 + a_{dw11}t01 + a_{dw12}t00 + a_{dw13}t99 + v_{dw0k} + v_{dw1k}dw_{ki} + e_{dw0ki} \quad (4)$$

jossa alaindeksi dw viittaa kuorettoman läpimitan kasvumalliin. $t04$, $t03$, $t02$, $t01$, $t00$, $t99$ ovat vuosittaiset valemuuttujat.

Inventoinnissa mitattiin kantoläpimitat vain harvennuksissa poistetuille puille. Tämän takia kyseisille puille jouduttiin arvioimaan rinnankorkeusläpimitat seuraavalla yhtälöllä:

$$d_{kanto} = 2 + 1,25d \quad (\text{Laasasenaho 1975}) \quad (5)$$

jossa d_{kanto} on kantoläpimitta ja d on rinnankorkeusläpimitta.

Kannoille laskettiin rinnankorkeusläpimitat kontrolli-inventointivuonna lisäämällä mallilla 5 lasketuihin rinnankorkeusläpimitoihin läpimitan kasvu harvennusvuoden ja kontrolli-inventointi vuoden välillä. Kasvu ennustettiin seuraavasti:

$$id_{ki} = a_{id0} + a_{id1}ma + a_{id2}ku + a_{id3}le + a_{id4}d_{ki} + a_{id5}T_k + v_{id0k} + e_{id0ki} \quad (6)$$

jossa alaindeksi id mallin parametreissa viittaa läpimitan kasvumalliin, jossa selittäjänä on rinnankorkeusläpimitta, T_k on aika vuosina harvennuksesta kontrolli-inventointiin. Harvennuksen jälkeen puun läpimitan kasvu lisääntyy vähentyneen kilpailun takia. Lisääntyminen ei kuitenkaan ole yhtäkkistä, vaan tapahtuu muutaman vuoden aikana puun sopeutuessa uuteen kilpailutilanteeseen. Ositteissa 1, 2 ja 4 muutos on merkitsevä. Muut merkinnät ovat samat kuin edellisissä malleissa. Tämän jälkeen kantoja käsiteltiin, kuin muitakin aineiston lukupuita, ja niille laskettiin puuttuvat tunnuksat malleilla 1, 2, 3 ja 4.

Pituudet tarkastelujakson alkuun ja harvennusvuoteen laskettiin vähentämällä keskimääräisiä vuosittaisia pituuskasvuja kontrolli-inventointivuoden pituuksista. Vuosittainen keskimääräinen pituuskasvu ennustettiin seuraavalla mallilla:

$$ih_{ki} = a_{ih0} + a_{ih1}ku + a_{ih2}\ln(h_{ki}) + a_{ih3}d_{ki} + v_{ih0k} + e_{ih0ki} \quad (7)$$

jossa alaindeksi ih mallin parametreissa viittaa pituuskasvumalliin.

Kuusiositteissa aineiston mittauksessa ongelmana oli, että vain osasta kuusia (176) pystyttiin mittaamaan koko tarkastelujakson pituuskasvu, mutta kahden vuoden pituuskasvu voitiin mitata huomattavasti suuremmasta puujoukosta (341). Kuusiositteissa laskettiin ensiksi vuosittainen pituuskasvu mallilla 7 siten, että selitettävänä muuttujana oli kahden vuoden perusteella laskettu keskimääräinen pituuskasvu. Tämän jälkeen selitettiin koko tarkastelujakson keskimääräistä vuosittaista pituuskasvu kahden vuoden perusteella lasketulla keskimääräisellä vuosittaisella pituuskasvulla. Pituuskasvun muunnosmalli oli muotoa:

$$ih_{kjasvoki} = a_{ih0} + a_{ih1}ih_{ki} + v_{ih0k} + e_{ih0ki} \quad (8)$$

Puustotunnukset laskettiin koealoittain kontrolli-inventointivuoteen, mahdolliseen harvennusvuoteen ja tarkastelujakson alkuun. Kuvioittaiset puustotunnukset saatiin koealoittaisten tunnusten keskiarvona.

3.2 Vertailtavien puustotunnusten muodostaminen alkutilaan

Virhelähteiden kokonaisvaikutuksen erotteliseksi muodostettiin alkutilat kolmella eri tavalla: A) kontrolli-inventoinnin avulla tarkastelujakson alkuun muodostetut puutason tiedot, B) näistä puutason tiedoista lasketut puustotunnukset, sekä C) kuvioittaisen arvioinnin puustotunnukset.

- A) Puutason kontrollitunnukset muodostettiin kuvamalla kuvion puusto inventointikoealojen summalla. Kuvion tarkastelujakson alkuun lasketut puutunnukset syötettiin simulaattoriin siten, että alueena, jolta puut oli mitattu, käytettiin kuvion koealojen yhteen laskettua pinta-alaa. Puun kuvaamiseen käytetyt syöttötiedot olivat puulaji, rinnankorkeusläpimitta ja pituus.
- B) Kontrolli-inventoinnin avulla tarkastelujakson alkuun muodostetuista kontrollipuustotunnuksista muodostettiin toinen alkutila ennustamalla malleilla näistä tunnuksista uudet puutason tiedot. Näin muodostetussa alkutilassa oli mukana puutason tiedon generoinnista aiheutuneet virheet. Puuston kuvaamisen käytetyt syöttötiedot olivat puusto-ositteittaiset: puulaji, ikä, runkoluku, pohjapinta-ala, keskiläpimitta ja -pituus.
- C) Kolmas alkutila saatiin kuvioittaisen arvioinnin puustotunnuksista. Nämä tiedot sisältivät puutason tiedon generoinnin ja kuvioittaisen arvioinnin virheen. Puuston kuvaamiseen käytetyt syöttötiedot olivat samat kuin kontrolli-inventoinnin puustotason tiedoissa.

3.3 Eri virhelähteiden vaikutuksen erottelu

Kontrolli-inventoinnin avulla muodostetut kontrollipuustotunnukset toimivat kaikkien simulointien vertailukohtana. Edellä mainituilla eri tavoilla muodostetuista alkutiloista simuloitiin metsiköiden kehitys kontrollivuoteen saakka, jonka jälkeen virheiden vaikutukset saatiin ennustetun kehityksen ja kontrollipuustotunnusten erotuksena (taulukko 2).

Taulukko 2. Virhelähteiden vaikutuksen erottelu.

Vaihtoehto	Alkutila: Puustotunnukset	Alkutila: Puutunnukset	Lopputila: Puu- ja puustotunnukset	Tutkittu virhelähde
0			Kontrolli-inventointi	
A		Kontrolli-inventointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste
B	Kontrolli-inventointi	Puutason tiedon generointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste Puutason tiedon generointi
C	Kuvioittainen arviointi	Puutason tiedon generointi	Simulointi alkutilasta	Kasvuennuste Puutason tiedon generointi Kuvioittainen arviointi

Taulukko 3. Kontrolli-inventoinnin avulla muodostettuja pääpuulajin puustotunnuksia tarkastelujakson alussa. Kuvion keski- ja summatunnusten tunnusluvut ovat keskiarvo, hajonta (s), minimi (min) sekä maksimi (max). Vastaavat tunnuksat on esitetty myös kuvioiden sisältämien koealojen väliselle hajonnalle.

		Kuvioiden keski- ja summatunnukset				Kuvioiden koealojen välinen hajonta			
		keskiarvo	s	min	max	keskiarvo	s	min	max
Osite 1	G, m ² ha ⁻¹	10,1	3,1	5	17,3	5	1,4	2	7,7
	N, ha ⁻¹	1309	475	467	2468	539	146	189	806
	DGM, cm	11,6	2,2	8,3	17,4	2,6	1	1,3	4,6
	HGM, m	9,5	1,4	6,7	12,9	1,4	0,5	0,5	2,7
Osite 2	G, m ² ha ⁻¹	12,8	2,5	8,9	16,9	5,1	1,5	3	8,3
	N, ha ⁻¹	960	372	320	1612	385	123	135	650
	DGM, cm	15,7	2,8	10,5	20,4	3,6	1	2,1	5,4
	HGM, m	12,2	1,3	9,1	14,5	1,4	0,5	0,7	2,4
Osite 3	G, m ² ha ⁻¹	7,8	3,8	1,4	15,3	4,3	2,9	1,2	13,5
	N, ha ⁻¹	1206	518	314	2402	488	299	84	1440
	DGM, cm	10,5	3	6,1	17,4	2,4	1,6	0,6	5,8
	HGM, m	8,3	1,1	6,3	9,8	1,1	0,7	0,2	2,4
Osite 4	G, m ² ha ⁻¹	18,4	3,9	10,1	23,8	6,7	2,8	1,8	11,4
	N, ha ⁻¹	684	207	295	1067	230	108	57	503
	DGM, cm	20,7	2,6	16,9	25,9	3,7	2,1	1,3	8,1
	HGM, m	15,1	1,4	11,6	17,5	1,7	0,6	0,9	3,3

Metsikön kehitys ennustettiin kuvioittaisen arvioinnin toteuttamisvuodesta kontrollivuoteen Motti-ohjelmistolla (Hynynen ym. 2002).

4 Tulokset

4.1 Kuviot tarkastelujakson alussa

Kuvioiden pinta-alojen keskiarvo oli 2,2 ha vaihteluvälillä 0,34–10,78 ha. Pienen keskimääräinen pinta-ala oli ensiharvennuskusikoissa (0,8 ha), ja suurin puolukaturvekankaiden ensiharvennuskusikoissa (3,6 ha). Kontrolli-inventoinnin avulla lasketut puustotunnuksat on esitetty taulukossa 3.

Kuvioiden sisältämien koealojen välinen summa- ja keskitunnusten hajonta oli samansuuntaista kaikissa ositteissa, pohjapinta-alassa n. 32 %, runkoluvussa n. 27 %, keskiläpimitassa n. 18 % ja keskipituudessa n. 12 %.

4.2 Kuvioittaisen arvioinnin virheet

Kuvioittaisen arvioinnin puustotunnuksia verrattiin alkutilan kontrollipuustotunnuksiin alueella toteutetun kuvioittaisen arvioinnin luotettavuuden arvioimiseksi. Vertailut tehtiin kuvion pääpuulajin suhteen. Kaikissa ositteissa pohjapinta-ala keskimäärin yliarvioitiin (systemaattinen ero) (2–25 %). Keskiläpimita oli aliarvioitu (9–14 %). Keskipituuden arviot jakaantuivat ositteittain n. 5 % ali- ja yliarvioihin. Kontrolli-inventoinnin ja kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten erotusten tunnuslukuja on esitelty taulukossa 4.

4.3 Puutason tiedon generoinnin virhe

Puutason tiedon generoinnin virhettä tarkasteltiin vertaamalla Motti-ohjelmiston tarkastelujakson alkutilan kontrollipuustotunnuksista generoimia puustotunnuksia edellä mainittuihin kontrollitietoihin. Puustotunnuksista laskettiin erotukset, joita on esitelty taulukossa 5.

Motti-ohjelmistossa runkolukujakauma kalibroidaan annetun pohjapinta-alan tai runkoluvun mukaan riippuen puuston keskipituudesta, joten kuvio-

Taulukko 4. Kontrolli-inventoinnin ja kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten erotusten tunnuslukuja. Kuvioitten lukumäärä, jolla tunnus on mitattu (n), eron keskiarvo, eron hajonta (s), eron minimi (min) ja eron maksimi (max). Vertailut koskevat ositteen pääpuulajia.

		n	keskiarvo	s	min	max
Osite 1	G, m ² ha ⁻¹	16	-2,7	3,7	-8,7	5,3
	N, ha ⁻¹	6	-784	654	-1888	76
	DGM, cm	22	1,6	2,5	-3,4	7,1
	HGM, m	22	0,5	2,0	-4,5	5,2
Osite 2	G, m ² ha ⁻¹	19	-1,8	3,7	-10,0	4,0
	N, ha ⁻¹	0				
	DGM, cm	19	1,5	2,0	-2,0	4,8
	HGM, m	19	-0,6	1,7	-3,4	3,1
Osite 3	G, m ² ha ⁻¹	6	-1,0	4,9	-5,7	7,6
	N, ha ⁻¹	15	-246	468	-1174	568
	DGM, cm	21	1,1	2,1	-1,9	5,4
	HGM, m	21	0,4	1,6	-2,9	3,0
Osite 4	G, m ² ha ⁻¹	22	-0,3	3,4	-8,0	5,3
	N, ha ⁻¹	0				
	DGM, cm	22	2,3	1,7	-1,5	5,1
	HGM, m	22	-1,2	1,1	-3,7	0,6

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

Osite	N, ha ⁻¹		G, m ² ha ⁻¹		DGM, cm		HGM, m	
	keskiarvo	s	keskiarvo	s	keskiarvo	s	keskiarvo	s
1	-38	25	0,22	0,39	0,30	0,56	0,42	0,31
2	-23	14	0,03	0,07	0,30	0,47	0,37	0,19
3	-27	30	0,18	0,18	0,30	0,52	0,33	0,30
4	-14	23	0,06	0,14	0,40	0,57	0,57	0,37

tasolla toinen tunnuksista on aina virheetön, mutta ositteen yli tarkasteltaessa molemmissa tunnuksissa on pieniä eroja kyseiseen kontrollipuustotunnukseen verrattuna. Keskiläpimitan generoinnin virheet ovat pieniä. Keskipituudessa generointi tuottaa kaikkiin ositteisiin n. 2 % aliarvion.

4.4 Tarkastelujakson lopputilan ennustaminen

4.4.1 Kasvun ennustevirhe

Kasvun ennustevirheen vaikutusta puustotunnuksiin tutkittiin simuloimalla kontrolli-inventoinnin avulla tarkastelujakson alkuun johdettujen kuvioittaisten puustotunnusten kasvua tarkastelujakson loppuun. Tarkastelujakson pituus oli keskimäärin 5,3 vuotta. Simuloinnin tuloksia verrattiin lopputilan kontrollipuustotunnuksiin. Simuloinnissa oletettiin, ettei luonnonpoistumaa tapahdu, joten runkoluvussa ei tapahtunut muutoksia (kuva 1).

Pohjapinta-ala aliarvioitui kaikissa ositteissa. Pohjapinta-alan aliarvio oli suurin kuusiositteissa (1,29 m²ha⁻¹ ja 1,64 m²ha⁻¹). Mäntyositteissa pohjapinta-alan aliarvio oli keskimäärin 0,18 m²ha⁻¹ ja 0,21 m²ha⁻¹. Keskiläpimita yliarvioitui mäntyositteissa ollen 0,17 cm ja 0,31 cm. Ensiharvennuskuusikoissa keskiläpimita aliarvioitui 0,31 cm. Varttuneissa kuusikoissa keskiläpimita ennustettiin ilman selkeää systemaattista eroa. Keskipituus aliarvioituu, paitsi ensiharvennuskuusikoissa, joissa se ennustettiin ilman systemaattista eroa. Mäntyositteissa aliarvio oli keskimäärin 0,81 m ja 1,01 m ja varttuneissa kuusikoissa 0,47 m. Pohjapinta-alan, keskiläpimitan ja keskipituuden hajonnat vaihtelivat 0,79–2,19 m²ha⁻¹, 0,71–1,20 cm ja 0,48–0,74 m. Taulukossa 6 on esitetty kaikkien eri virhelähteiden harhat ja hajonnat puustotunnuksissa.

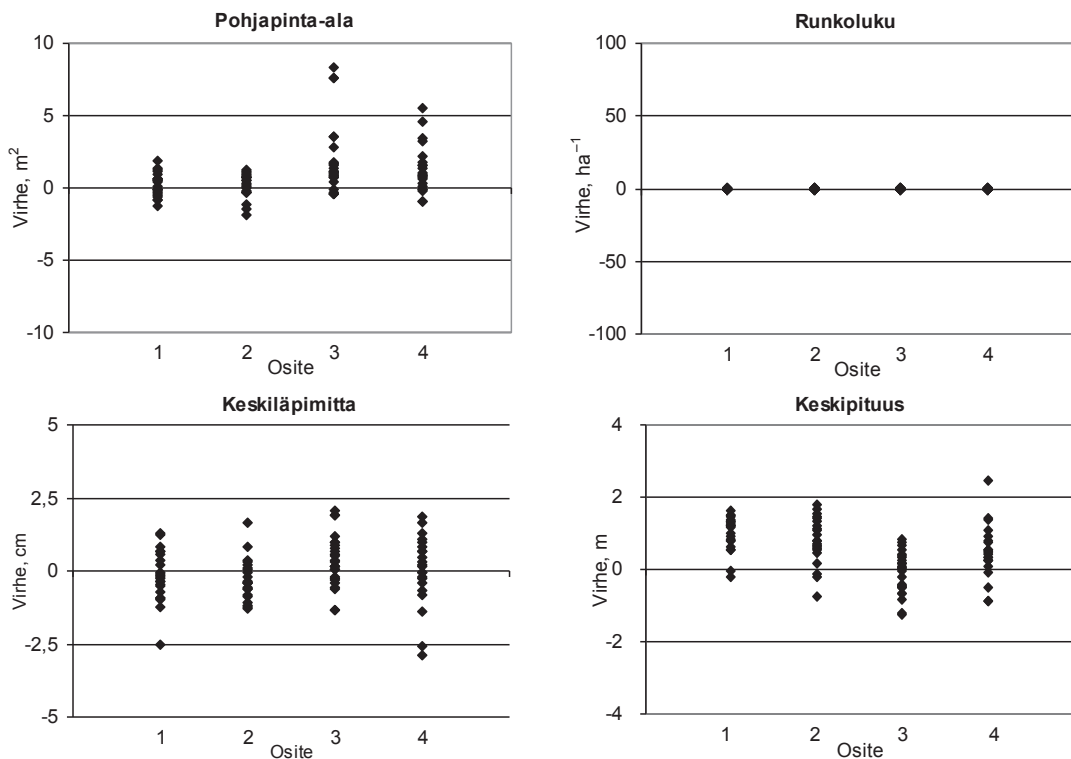
4.4.2 Puutason tiedon generoinnin ja kasvuennusteen yhteisvirhe

Puutason tiedon generoinnin ja kasvuennustuksen yhteisvirhettä (kas+gen) tutkittiin simuloimalla kontrolli-inventoinnin avulla tarkastelujakson alkuun johdettujen kuvioittaisten puustotunnusten kasvua tarkastelujakson loppuun. Simuloinnin tuloksia verrattiin lopputilan kontrollipuustotunnuksiin (kuva 2).

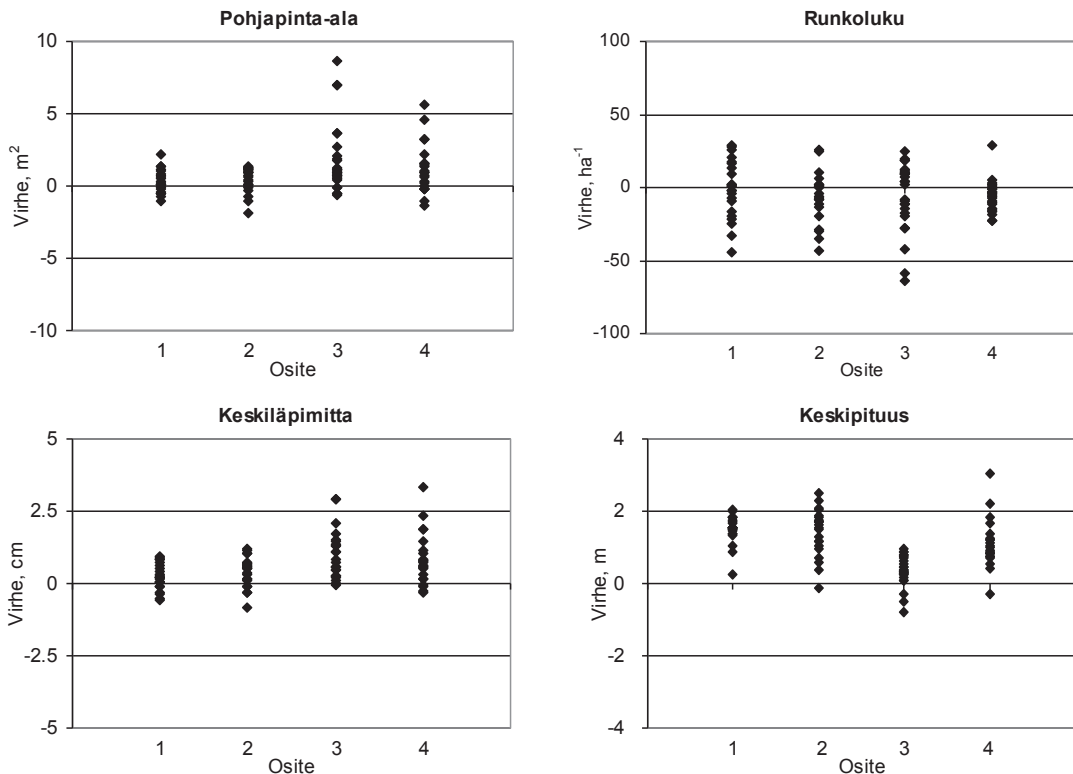
Mäntyositteissa pohjapinta-alan aliarviot olivat keskimäärin 0,28 m²ha⁻¹ ja 0,43 m²ha⁻¹ ja kuusiositteissa 1,29 m²ha⁻¹ ja 1,64 m²ha⁻¹. Keskiläpimita aliarvioitui kaikissa ositteissa. Aliarvio oli pienimmillään mäntyositteissa, keskimäärin 0,23 cm

Taulukko 6. Kasvuennusteen (kas), kasvuennusteen ja puutason tiedon generoinnin yhteisvirheen (kas+gen) sekä kuvioittaisen arvioinnin, kasvuennusteen, ja puutason tiedon generoinnin yhteisvirheen (kas+gen+kuv) aiheuttamat harhat (b) ja virheiden hajonnat (s) ajantasaistetuissa puustotunnuksissa ositteittain. Virheet on laskettu lopputilan kontrollipuustotunnusten ja lopputilaan simuloitujen puustotunnusten erotuksena.

Virhelähde	N, ha ⁻¹		G, m ² ha ⁻¹		DGM, cm		HGM, m	
	b	s	b	s	b	s	b	s
1 Kuivahkon kankaan ensiharvennuskanniköt								
kas			0,21	0,79	-0,17	0,87	1,01	0,48
kas+gen	-1	20	0,28	0,78	0,23	0,45	1,50	0,38
kas+gen+kuv	-834	540	-2,83	3,69	3,38	2,25	0,02	1,61
2 Puolukkaturvekankaan ensiharvennuskanniköt								
kas			0,18	0,85	-0,31	0,71	0,81	0,64
kas+gen	-6	17	0,43	0,86	0,40	0,52	1,43	0,64
kas+gen+kuv	-561	551	-1,87	4,30	3,91	1,84	-1,20	2,19
3 Lehtomaisen kankaan ensiharvennuskuusikot								
kas			1,64	2,19	0,31	0,79	-0,08	0,59
kas+gen	-6	24	1,60	2,21	0,87	0,74	0,36	0,45
kas+gen+kuv	-427	695	-0,34	5,05	3,94	1,71	-3,16	2,10
4 Lehtomaisen kankaan varttuneet kuusikot								
kas			1,29	1,67	0,04	1,20	0,47	0,74
kas+gen	-6	11	1,20	1,70	0,84	0,89	1,09	0,67
kas+gen+kuv	-553	337	0,28	3,83	6,61	2,20	-2,08	1,87



Kuva 1. Kasvun ennustuksen virhe kuivahkon kankaan (1) ja puolukkaturvekankaan (2) ensiharvennuskanniköissä sekä lehtomaisen kankaan ensiharvennuskuusikoissa (3) ja lehtomaisen kankaan varttuneissa kuusikoissa (4).



Kuva 2. Puutason tiedon generoinnin ja kasvuennustuksen yhteisvirhe kuivahkon kankaan (1) ja puolukkaturvekankaan (2) ensiharvennuskusikoissa sekä lehtomaisen kankaan ensiharvennuskusikoissa (3) ja lehtomaisen kankaan varttuneissa kusikoissa (4).

ja 0,40 cm. Ensiharvennuskusikoissa keskiläpimitan systemaattinen ero oli 0,87 cm ja varttuneissa kusikoissa 0,84 cm. Kuusiositteiden pituuskehitys ennustettiin paremmin kuin mäntyositteiden. Keskipituuden aliarvio oli 0,36 m ensiharvennuskusikoissa ja varttuneemmissa 1,09, kun se mäntyositteissa oli keskimäärin 1,43 m ja 1,50 m. Puustotunnusten virheiden hajonta oli samaa suuruusluokkaa kuin pelkän kasvun ennusteen virheen aiheuttama hajonta.

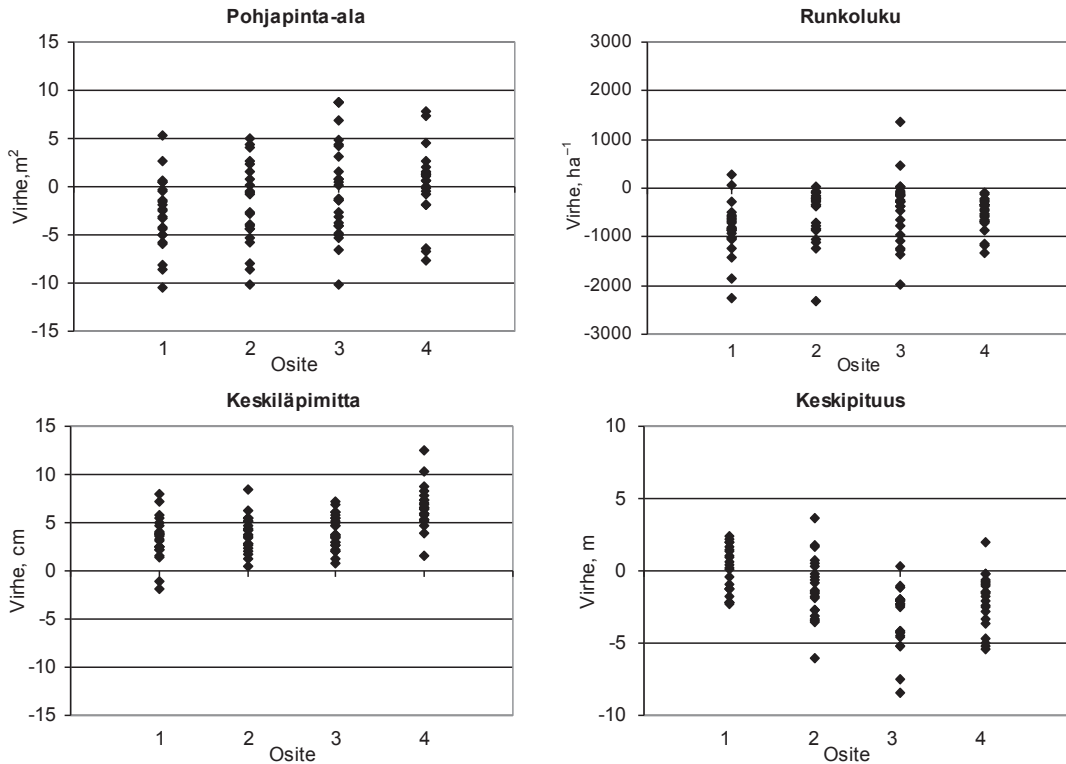
4.4.3 Kuvioittaisen arvioinnin, puutason tiedon generoinnin ja kasvuennusteen yhteisvirhe

Kuvioittaisen arvioinnin, puutason tiedon generoinnin ja kasvuennusteen yhteisvirhettä (kas+gen+kuv) tarkasteltiin simuloimalla vanhoja kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten kasvua tarkastelujakson

loppuun. Saatuja simuloinnin tuloksia verrattiin lopputilan kontrollipuustotunnuksiin (kuva 3).

Kaikkien ositteiden runkoluvut yliarvioituvat (427–834 ha⁻¹). Mäntyositteiden pohjapinta-ala yliarvioitui keskimäärin 1,87 m²ha⁻¹ ja 2,83 m²ha⁻¹. Kuusiositteiden pohjapinta-alaan ei tullut keskimäärin suurta virhettä, mutta virheen hajonta oli samaa luokkaa kuin mäntyositteissa ollen 3,83 m²ha⁻¹ ja 5,05 m²ha⁻¹. Useimmissa puustotunnuksissa systemaattiset erot moninkertaistuvat verrattuna kasvun ennusteen tai kasvun ennusteen ja generoinnin aiheuttamiin systemaattisiin eroihin. Hajonta pohjapinta-alaassa kasvoi mäntyositteissa noin viisinkertaiseksi ja kuusiositteissa noin kaksinkertaiseksi verrattuna edellä tarkasteltujen virhelähteiden aiheuttamiin hajontoihin.

Kuvioittaisen arvioinnin, puutason tiedon generoinnin ja kasvuennusteen yhteisvirhe aiheutti voimakkaan keskiläpimitan aliarvion. Systemaattiset



Kuva 3. Kuvioittaisen arvioinnin, puutason tiedon generoinnin ja kasvunennustuksen yhteisvirhe kuivahkon kankaan (1) ja puolukkaturvekankaan (2) ensiharvennusmänniköissä sekä lehtomaisen kankaan ensiharvennuskuusikoissa (3) ja lehtomaisen kankaan varttuneissa kuusikoissa (4).

erot kasvoivat keskiläpimitassa kaikissa ositteissa vielä enemmän kuin pohjapinta-alassa verrattuna kasvun ennusteen tai kasvun ennusteen ja generoinnin aiheuttamiin systemaattisiin eroihin. Keskiläpimita aliarvioitiin ositteittain 3,38–6,61 cm.

Keskipituus kuvautui lähes harhattomasti kuivahkon kankaan männiköissä, muissa ositteissa se yliarvioitiin 1,20–3,16 m. Edellisiin virhelähteisiin verrattuna systemaattiset erot metsikön keskitunnuksissa kasvoivat kuusiositteissa merkittävästi.

Kuvioittainen arviointi moninkertaisti virheiden suuruuden ja hajonnan (Huomaa, että kuvan 3 akselien mittakaavat ovat erisuuruiset kuin kuvissa 1 ja 2).

5 Tarkastelu

Ajantasaistettujen puustotunnusten merkittävin virhelähde oli alkutietoina käytetyissä kuvioittaisen arvioinnin puustotunnuksissa. Vastaavanlaisia tuloksia ovat saaneet myös Ojansuu ym. (2002), sekä Haara ja Korhonen (2004). Kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten sisältämät virheet moninkertaistivat muiden tutkittujen virhelähteiden aiheuttaman epävarmuuden ajantasaistetuissa puustotunnuksissa. Kasvuennusteen ja kasvuennusteen sekä puutason tiedon generoinnin virheen yhteisvaikutuksella oli merkitystä tietyissä puustotunnuksissa, mutta kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten virheisiin verrattuna ne jäivät lyhyellä ajantasaistusjaksolla pieniksi.

Kasvuennuste aliarvioi pohjapinta-alan kasvua kuusiositteissa. Pohjapinta-ala aliarvioitiin samalla tavalla ajantasaistamalla niin puu- kuin puustotason

lähtötietoja. Mäntyositteiden pituuskasvun aliarvio oli toinen merkittävä kasvuennusteen tuottama virhe. Kasvuennusteen ja puutason tiedon generoinnin virheiden yhteisvaikutus lisäsi mäntyositteiden keskipituuden aliarviota 49–62 cm verrattuna pelkän kasvun ennustevirheen aiheuttamaan aliarvioon. Todennäköisesti pelkän kasvun ennustevirheen merkitys korostuisi pidemmällä ajantasaistusjaksolla (kts. esim. Holopainen ym. 2010a).

Puutason tiedon generoinnilla ei todettu olevan ratkaisevaa merkitystä ajantasaistetun tiedon tarkkuuteen. Puu- ja puustotunnuksia ajantasaistamalla päästiin lähes yhtä tarkkoihin tuloksiin. Tätä tukevat myös Haaran ja Korhosen (2004) ja Holopaisen ym. (2009) saamat tulokset. Puutunnusten generoinnin virheiden vaikutus näkyisi vasta puutavaralajitasolla, jolloin mahdolliset erot teoreettisen ja todellisen runkolukusarjan välillä aiheuttaisivat virhettä.

Aineisto on kerätty pieneltä alueelta ja tutkitut ositteet ovat tarkasti määriteltyjä, joten tuloksia ei voi suoraan yleistää muille maantieteellisille alueille, muille puulajeille, eri kehitysvaiheissa oleville puustoille, taikka eri kasvupaikkatyypeille. Kasvun ennustamista koskevat tulokset ovat myös sidottuja malleihin, joilla metsän kasvu on kuvattu. Tulosten luotettavuuteen vaikuttaa kontrolli-inventoinnin otanta- ja mittausvirheet sekä mallivirheet koepuutunnusten yleistämisessä lukupuille ja puutunnusten laskennassa tarkastelujakson alkuun. Koelaotannasta johtuva satunnainen virhe vaihteli kuvioittain. Puustotunnusten koalojen välinen keskivirhe oli joillain kuvioilla varsin suuri, joten yksittäistä kuviota koskevissa tiedoissa voi esiintyä merkittävää epävarmuutta. Tutkimuksen merkittävin virhelähde oli kuvioittainen arviointi. Alue, josta aineisto kerättiin, oli pieni, joten yksittäisen suunnittelijan virheet näkyvät kuvioittaisen arvioinnin tuloksissa. Kuvioittaisen arvioinnin tarkkuuden on todettu vaihtelevan suunnittelijoiden välillä (Saari ja Kangas 2005), joten toisella suunnittelijalla virheet olisivat voineet olla hyvin erilaiset.

Tulevaisuudessa yksityiskohtaisella kaukokartoituksella, eli etenkin lentokoneesta tehtävällä laserkeilauksella (ALS) tulee olemaan tärkeä rooli metsävaratiedon ajantasaistuksen lähtötietoina. Useiden tutkimusten (mm. Suvanto ym. 2005, Packalen ja Maltamo 2007, Packalen 2009, Holopainen ym. 2010b) mukaan aluepohjaisen ALS-inventoinnin on

todettu tuottavan puuston keskitunnusten osalta tarkempia ja puulaji- tai puutavaralajioisitteiden osalta tarkkuudeltaan samaa tasoa olevia estimaatteja kuin kuvioittainen arviointi. Puulaji- ja puutavaralajiositteiden tulkintatarkkuus on kuitenkin molemmissa menetelmissä selkeästi huonompi kuin keskitunnusten (esim. keskitilavuus) tulkintatarkkuus. Uudessa ALS-perusteisessa suunnittelujärjestelmässä inventoinnit toteutetaan todennäköisesti kymmenen vuoden välein ja välivuosien tieto tuotetaan edelleen ajantasaistamalla.

Tutkimusaineistossa ajantasaistaminen kuvioittaisella arvioinnilla kerätyistä tiedoista aiheutti merkittäviä yksittäisiä virheitä verrattuna kontrollipuustoon. Lyhyillä ajantasaistusjaksoilla lähtötiedon tarkkuus määrää suurelta osin ajantasaistamisen luotettavuuden.

Kiitokset

Tutkimus rahoitettiin pääosin Pohjois-Savon TE-keskus Itä-Suomen tavoite 1 -ohjelmasta. Kirjoittajat haluavat kiittää MMM Jaakko Lehtistä osallistumisesta tutkimuksen maastoaineiston keräämiseen ja prof. Annika Kangasta arvokkaista kommentteista käsikirjoitukseen.

Lähteet

- Haara, A. 2002. Metsävaratietojen laskennallinen ajantasaistus yleistyy metsäsuunnittelussa – onko luotettavuuden arviointiin mahdollisuuksia? *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 479–492.
- & Korhonen, K.T. 2004. Toimenpide-ehdotusten tuottaminen laskennallisesti ajantasaistetusta kuvioaineistosta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2004: 157–173.
- & Leskinen, P. 2009. The assessment of uncertainty of updated stand-level inventory data. *Silva Fennica* (43): 87–112.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyypä, J., Hyypä, H., Kaartinen, H., Viitala R., Vastaranta, M. & Kangas, A. 2009. Effect of tree level airborne laser scanning accuracy on the timing and expected value of harvest decisions. *European Journal of Forest Research*

- 129(5): 899–907. Doi 10.1007/s10342-009-0282-6.
- , Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyytiäinen, K., Bayazidi, S. & Pietilä, I. 2010a. Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. *Forest Policy and Economics* 12 (2010): 377–386.
- , Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Kalliovirta, J., Mäkinen, A., Haapanen, R., Melkas, T., Yu, X., Hyyppä, J. 2010b. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research*. Painossa.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Salminen, H., Siipilehto, J. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 835. 110s. + liitteet.
- Hyvönen, P. & Korhonen, K.T. 2003. Metsävaratiedon jatkuva ajantasaistus yksityismetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2003: 83–96.
- Laasasenaho, J. 1975. Runkopuun saannon riippuvuus kannon korkeudesta ja latvan katkaisuläpimitasta. *Folia Forestalia* 233.
- 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.
- Maltamo, M., Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006. Non-parametric estimation of plot volume using laser scanning, aerial photography and stand register data. *Canadian Journal of Forest Research* (36): 426–436.
- Näslund, M. 1936. Skogsföranstaltens gallringsförsök i tallskog. Promärbearbetning. *Medd. Stat. Skogsförs. Anst.* 29(1). 170 s.
- Ojansuu, R., Halinen, M. & Härkönen, K. 2002. Metsätalouden suunnittelujärjestelmän virhelähteet männyn esiharvenuskypsytyden määrittämisessä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 441–457.
- Packalén, P. 2009. Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate growing stock by tree species. *Dissertationes Forestales* 77. 41 s.
- & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* (109): 328–341
- Saari, A. & Kangas, A. 2005. Kuvioittaisen arvioinnin harhan muodostuminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2005: 5–18.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Välimäki, E. & Kangas, A. 2009. Kasvumallien toiminnan validointi ylitiheissä metsiköissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2009: 97–112.

19 viitettä

Liite I. Puustotunnusten laskennassa käytettyjen sekamallien parametrien estimaatit

Liitetaulukko I. Pituusmallin muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keskivirheet (se). Mallin satunnaisosasta on esitetty käytettyjen muuttujien hajonta (s) ja niiden välinen korrelaatio (corr), sekä satunnaisvirheen hajonta (s).

Malli 1

Selitettävä Osite	$(h_{ki} - 1.3)^{-0.5}$	1		2		3		4	
Muuttuja	Parametri		se		se		se		se
vakio	a_{h0}	0.234	0.003	0.214	0.003	0.232	0.005	0.187	0.004
ku	a_{h1}	0.016	0.003	0.008	0.004				
le	a_{h2}	-0.021	0.003	-0.015	0.003	-0.060	0.004	-0.032	0.003
d_{ki}^{-1}	a_{h3}	0.868	0.033	1.033	0.042	1.227	0.055	1.379	0.068
vakio	$s(v_{h0k})$	0.020		0.010		0.013		0.023	
	$corr(v_{h0k}, v_{h1k})$	0.685		-0.688		-0.980		-0.859	
d_{ki}^{-1}	$s(v_{h1k})$	0.250		0.252		0.295		0.426	
	$s(e_{h0ki})$	0.019		0.019		0.032		0.017	
hav. lkm.		631		488		529		407	

Liitetaulukko 2. Kuoren kaksinkertaisen paksuuden mallissa kuorellisen läpimitan funktiona käytetyt muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keskivirheet (se). Mallin satunnaisosasta on esitetty käytettyjen muuttujien varianssi (var) ja niiden välinen kovarianssi (cov), sekä satunnaisvirheen varianssi (var).

Malli 2

Selitetty Osite	b_{2ki}	1		2		3		4	
Muuttuja	Parametri		se		se		se		se
vakio	a_{b0}	-0.157	0.029	-0.221	0.029	0.272	0.024	0.182	0.039
ma	a_{b1}					-0.557	0.212	-1.046	0.176
ku	a_{b2}	0.329	0.085	0.369	0.142				
le	a_{b3}	0.178	0.073	0.234	0.093	-0.213	0.018	-0.177	0.030
d_{ki}	a_{b4}	0.091	0.003	0.085	0.003	0.033	0.002	0.030	0.002
$d_{ki}ma$	a_{b5}					0.076	0.015	0.097	0.009
$d_{ki}ku$	a_{b6}	-0.043	0.008	-0.048	0.010				
$d_{ki}le$	a_{b7}	-0.052	0.007	-0.055	0.008				
vakio	$var(v_{b0k})$	0.003		0.014		0.005		0.048	
	$cov(v_{b0k}, v_{b1k})$	-0.002		-0.004		0.000		-0.004	
d_{ki}	$var(v_{b1k})$	0.000		0.000		0.000		0.000	
	$var(e_{b0ki})$	0.045		0.073		0.025		0.030	
hav. lkm.		631		489		528		408	

Liitetaulukko 3. Kuoren kaksinkertaisen paksuuden mallissa kuorettoman läpimitan funktiona käytetyt muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keskivirheet (se). Mallin satunnaisosasta on esitetty käytettyjen muuttujien varianssi (var) ja niiden välinen kovarianssi (cov), sekä satunnaisvirheen varianssi (var).

Malli 3

Selitetty Osite	b_{2ki}	1		2		3		4	
Muuttuja	Parametri		se		se		se		se
vakio	a_{bw0}	-0.131	0.033	-0.227	0.043	0.242	0.023	0.171	0.037
ma	a_{bw1}					-0.465	0.222	-1.034	0.186
ku	a_{bw2}	0.353	0.093	0.420	0.159				
le	a_{bw3}	0.177	0.082	0.268	0.108				
dw_{ki}	a_{bw4}	0.096	0.004	0.092	0.004	0.038	0.002	0.032	0.002
$dw_{ki}ma$	a_{bw5}					0.077	0.017	0.108	0.010
$dw_{ki}ku$	a_{bw6}	-0.050	0.009	-0.056	0.012				
$dw_{ki}le$	a_{bw7}	-0.058	0.008	-0.063	0.009	-0.020	0.002	-0.013	0.002
vakio	$var(v_{bw0k})$	0.008		0.000		0.007		0.049	
	$cov(v_{bw0k}, v_{bw1k})$	-0.002		-0.003		0.000		-0.004	
dw_{ki}	$var(v_{bw1k})$	0.000		0.001		0.000		0.000	
	$var(e_{bw0ki})$	0.054		0.090		0.026		0.035	
hav. lkm.		631		489		528		408	

Liitetaulukko 4. Kuorettoman läpimitan kasvumallissa käytetyt muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keski-
virheet (se). Mallin satunnaisosasta on esitetty käytettyjen muuttujien hajonta (s) ja niiden välinen korrelaatio (corr),
sekä satunnaisvirheen hajonta (s).

Malli 4

Selitettävä Osite Muuttuja	idw _{ki} Parametri	1		2		3		4	
			se		se		se		se
vakio	a _{dw0}	0.547	0.184	0.746	0.247	0.898	0.349	1.071	0.481
ma	a _{dw1}					-3.115	0.302		
ku	a _{dw2}	0.423	0.070	2.776	0.370				
le	a _{dw3}	0.780	0.215	1.022	0.115			-0.950	0.283
dw _{ki}	a _{dw4}	0.232	0.017	0.139	0.019	0.421	0.030	0.190	0.022
dw _{ki} ma	a _{dw5}							-0.139	0.017
dw _{ki} ku	a _{dw6}			-0.196	0.028				
dw _{ki} le	a _{dw7}	-0.095	0.023			-0.230	0.018		
t04	a _{dw8}	0.207	0.050	-0.077	0.050	0.515	0.098	0.353	0.093
t03	a _{dw9}	0.038	0.050	-0.382	0.050	0.310	0.098	-0.055	0.093
t02	a _{dw10}	0.336	0.050	-0.254	0.050	1.637	0.098	0.756	0.093
t01	a _{dw11}	0.112	0.050	-0.494	0.050	1.289	0.098	0.062	0.093
t00	a _{dw12}	0.284	0.050	-0.308	0.050	2.015	0.099	0.192	0.093
t99	a _{dw13}	0.056	0.051	-0.640	0.051	1.680	0.101	0.201	0.094
vakio	s(V _{dw0k})	1.106		1.059		1.954		1.873	
	corr(V _{dw0k} , V _{dw1k})	0.226		0.185		0.318		-0.189	
dw _{ki}	s(V _{dw1k})	0.199		0.216		0.311		0.224	
	s(e _{dw0ki})	0.864		0.742		1.476		1.268	
hav. lkm.		4155		3071		3104		2573	

Liitetaulukko 5. Harvennuksissa poistettujen puiden läpimitan kasvumallissa käytetyt muuttujat, parametrien esti-
maatit ja niiden keski-
virheet (se). Mallin satunnaisosassa käytetystä muuttujasta ja mallin satunnaisvirheestä esitetty
hajonta (s).

Malli 6

Selitettävä Osite Muuttuja	id _{ki} Parametri	1		2		3		4	
			se		se		se		se
vakio	a _{id0}	-0.576	0.196	-0.642	0.194	0.355	0.130	-1.665	0.375
ma	a _{id1}					-0.458	0.068	-1.206	0.072
ku	a _{id2}	0.071	0.026	0.290	0.046				
le	a _{id3}	-0.093	0.030	0.269	0.039	-0.568	0.035	-0.292	0.045
d _{ki}	a _{id4}	0.058	0.002	0.041	0.002	0.055	0.003	0.078	0.003
T _k	a _{id5}	0.273	0.067	0.289	0.072			0.521	0.104
vakio	s(V _{id0k})	0.327		0.259		0.425		0.461	
	s(e _{id0ki})	0.199		0.236		0.153		0.208	
hav. lkm.		609		766		121		300	

Liitetaulukko 6. Pituuskasvumallissa käytetyt muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keskivirheet (se). Mallin satunnaisosassa käytetystä muuttujasta ja mallin satunnaisvirheestä esitetty hajonta (s). Kuusiositteissa ih_{ki} on laskettu kahden vuoden keskimääräisen kasvun perusteella ja mäntyositteissa tarkastelujakson keskimääräisen kasvun perusteella.

Malli 7

Selitettävä Osite	ih_{ki}	1		2		3		4	
Muuttuja	Parametri	se		se		se		se	
vakio	a_{ih0}	0.063	0.037	-0.230	0.050	-0.106	0.090	0.019	0.122
ku	a_{ih1}			0.062	0.017				
$\ln(h_{ki})$	a_{ih2}	0.176	0.015	0.231	0.019	0.362	0.049	0.232	0.053
d_{ki}	a_{ih3}					-0.009	0.003	-0.007	0.002
vakio	$s(v_{ih0k})$	0.057		0.070		0.093		0.076	
	$s(e_{h0ki})$	0.056		0.057		0.126		0.110	
hav. lkm.		444		337		341		310	

Liitetaulukko 7. Kuusiositteissa pituuskasvun muuntomallissa tarkastelujakson keskimääräiselle pituuskasvulle käytetyt muuttujat, parametrien estimaatit ja niiden keskivirheet (se). Mallin satunnaisosassa käytetystä muuttujasta ja mallin satunnaisvirheestä esitetty hajonta (s). Lisämerkintä (*) tarkoittaa, että mallin laadinta-aineistossa käytetty vain kuusikoepuita ja pituuskasvu on estimoitu vain kuusille. Muussa tapauksessa käytettiin kaikkia ositteen koepuita ja pituuskasvu estimoitiin muille puulajeille.

Malli 8

Selitettävä Osite	ih_{kjakso}	3*		4*		3		4	
Muuttuja	Parametri	se		se		se		se	
vakio	a_{ih0}	0.179	0.030	0.236	0.025	0.176	0.030	0.237	0.026
ih_{ki}	a_{ih1}	0.534	0.046	0.484	0.045	0.541	0.047	0.483	0.047
vakio	$s(v_{ih0k})$	0.067		0.049		0.066		0.053	
	$s(e_{h0ki})$	0.079		0.057		0.081		0.058	
hav. lkm.		167		138		176		149	