



Arto Haara



Kari T. Korhonen

Arto Haara ja Kari T. Korhonen

Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus

Haara, A. & Korhonen, K.T. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. Metsätieteen aikakauskirja 4/2004: 489–508.

Tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa tietoa nykyisin käytössä olevan SOLMU-muotoisen kuvioittaisen arvioinnin luotettavuudesta, jossa puusto mitataan puusto-ositteittain. Tutkimusaineisto käsitti 1304 kuviota, joista 142 oli taimikkokuviota. Pääosin Itä-Suomessa sijaitseva tutkimusaineisto mitattiin vuosina 1997–1998. Tutkimuksessa tarkasteltiin kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta kuvion ja puulajiositteiden keskitilavuuden, keskiläpimitan, keskipituuden, keski-ian, pohjapinta-alan sekä tukki- ja kuitutilavuuden keskivirheen ja harhan avulla. Luotettavuutta tarkasteltiin myös osittamalla aineisto pääryhmän, metsätyypin, kehitysluokan ja vallitsevan puulajin mukaan. Lisäksi tutkittiin mittaajien välistä vaihtelua. Tutkimuksessa vertailtiin myös erilaisia läpimittajakaumamalleja kuvauspuiden muodostamisessa osana inventointitulosten laskentaa.

Tutkimuksessa kuvion keskitilavuuden keskivirheeksi saatiin 24,8 %. Tarkistusmittauksen otantavirhe vähennettynä em. keskivirheeksi tuli 21,4 %. Keskitilavuus aliarvioitiin 1,6 %. Puulajeista männyn suhteelliset keskivirheet olivat kaikissa puustotunnuksissa pienimmät. Pohjapinta-ala ja keskitilavuus aliarvioitiin selvästi runsaspuustoisissa metsiköissä. Vähäpuustoisten metsiköiden pohjapinta-ala yliarvioitiin hieman. Mittaajien välinen vaihtelu oli huomattavaa. Keskitilavuuden mittaajakohtainen keskivirhe vaihteli 10,6 %:sta 33,9 %:iin (arvioijakohtainen otantavirhe poistettu tarkistusmittauksista). Pohjapinta-alan mittaajakohtainen keskivirhe vaihteli 6,6 %:sta 24,5 %:iin.

Tutkimustuloksia on mahdollista hyödyntää esimerkiksi metsävaratiedon laadun määrittämisessä, kuvioittaisen arvioinnin kehitystyössä ja vaihtoehtoisten tiedonhankintamenetelmien arvioinneissa.

Asiasanat: arviointivirhe, mittausvirhe, inventointi, kuvioittainen arviointi

Yhteystiedot: Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu

Sähköposti: arto.haara@metla.fi

Hyväksytty 8.11.2004

I Johdanto

Yksityismetsien metsäsuunnittelun tarvitsemat kasvupaikka- ja puustotiedot kerätään kuvioitaisella arvioinnilla 10–20 vuoden välein. Metsäkeskuksen suunnittelija arvioi tilan puustotiedot kultaakin tilan kuvioilta ja laatii yhteistyössä metsänomistajan kanssa metsäsuunnitelman tilalle. Kerättävien puustotietojen varassa on simuloitava tilan kuvioiden kehitys ja laskettava hakkuukertymät sekä suoritettava jonkinasteinen optimointi metsänhoitosuosituksen rajoissa ja metsänomistajan tavoitteiden mukaisesti. Käytettävän metsävaratiedon tulisi olla mahdollisimman tarkkaa ja ajantasaista.

Kuvioitaisessa arvioinnissa tapahtui merkittävä muutos 1990-luvun puolella välissä käyttöön otetun SOLMU-metsäsuunnittelujärjestelmän (SOLMU. Maastotyöopas... 1996) myötä. Aikaisemmin käytetyssä TASO-järjestelmässä (TASO. Maastotyöopas... 1993) kuvioilta arvioitiin vain yhden keskipuun tunnuksat (läpimitta, pituus ja ikä), ja puulajisuhteet kirjattiin arvioimalla puulajien osuudet tilavuudesta tai pohjapinta-alasta. SOLMU-muotoisessa arvioinnissa puuston keskitunnukset kerätään kaikille kuviolla esiintyvillä puulajeille ja -jaksoille. Kunkin näin kerättävän puusto-ositteen pohjapinta-alamediaanipuun puustotunnukset sekä pohjapinta-ala tai runkoluku arvioidaan. TASO-muotoisessa arvioinnissa ongelmia tuottivat varsinkin sekametsien ja eri-ikäisrakenteisten metsien kuvaaminen. SOLMU-muotoisella tiedolla on pyritty hyödyntämään kehittyneitä laskentamenetelmiä, parantamaan kehityssennusteiden laatua ja palvelemaan paremmin puukaupan muuttuvia tarpeita (SOLMU. Maastotyöopas... 2003).

Kuvioittainen arviointi on subjektiivinen inventointimenetelmä. Suunnittelija käyttää omaa harkintaansa jo kuvioiden rajaamisesta lähtien. Kerätessään kuvion puustotietoja relaskoopikoealoilta suunnittelija päättää itse koealojen määrän ja sijoittelun. Myös puustotunnusten arviointiin liittyy silmävaraista arviointia esimerkiksi puusto-ositteiden erottamisessa ja puusto-ositteiden pohjapinta-alamediaanipuuden valinnassa.

Mittausvirheet esitetään yleensä ns. klassista mittausvirhemallia käyttäen (Carroll ym. 1995). Mallissa oletetaan implisiittisesti, että virhe korreloi havaitun arvon kanssa tosiarvon sijasta. Lisäksi havaitun arvon

hajonta on suurempi kuin tosiarvon. Koska kuvioitaiseen arviointiin liittyy paljon harkinnanvaraisuutta, voivat kerättävien puustotunnusten mittausvirheet muodostua siten, että tarkasteltavan muuttujan arvo on kontrolloitavissa. Tällöin havaittu arvo on kiinteä, tiettyyn samantyyppisten metsiköiden vakioarvoon säädetty ”mittariarvo”, jonka ympärillä tosiarvot vaihtelevat (Lappi 1993, Kangas ym. 2002). Tällöin puhutaan ns. Berksonin tapauksesta. Toisin kuin klassisessa mittausvirhemallissa, virhe ei tällöin korreloi havaitun arvon kanssa, vaan se korreloi tosiarvon kanssa (Lappi 1993). Lisäksi tosiarvojen varianssi on suurempi kuin havaittujen arvojen (Kangas ym. 2002). Mittausvirhe voi olla myös klassisen mallin ja Berksonin tapauksen yhdistelmä, jolloin virhe korreloi sekä havaitun että tosiarvon kanssa ja varianssit ovat jotakuinkin samansuuruisia.

Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta on tutkittu Suomessa jonkin verran. Tutkimuksista pääosa ja varsinkin laajimmat (mm. Laasasenaho ja Päivinen 1986, Poso 1983) ajoittuvat ajalle, jolloin puustotiedot kerättiin metsikkökohtaisesti TASO-muotoisina. Nykyisin kerättävän SOLMU-muotoisen arvioinnin luotettavuutta on tutkittu vain pienillä tarkistusmittausaineistoilla, ja pääpaino näissä tutkimuksissa on kiinnitetty vaihtoehtoihin tiedonhankintamenetelmiin, kuten kaukokartoitusmenetelmiin (mm. Pusinen 1992, Anttila 2002a, Hyvönen 2002). Osassa tutkimuksista on kiinnitetty huomiota puustotunnusten arviointivirheisiin koealalta (mm. Kangas ym. 2002).

Kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten arviointivirheet ja -harhat vaihtelevat eri tutkimuksissa (taulukko 1). Esimerkiksi pohjapinta-alan systemaattinen virhe on joissakin tutkimuksissa ollut jopa 12 %:n luokkaa ja keskivirhe 11–22 % (Purola 1983, Mähönen 1984, Laasasenaho ja Päivinen 1986, Pusinen 1992, Ståhl 1992, Pigg 1994). Myös mittaajien välinen vaihtelu voi olla suurta: esimerkiksi pohjapinta-alan arviointivirheet vaihtelevat suuresti mittaajien kesken (Laasasenaho ja Päivinen 1986, Nerseten ja Næss 1992, Ståhl 1992).

Kun puuston tilavuus- ja kertymätietojen laskennassa käytettävät läpimittajakaumamallit estimoitiiin alun perin, niissä käytettiin selittäjinä kuvioitaisessa arvioinnissa tuolloin kerättyjä puustotunnuksia. Nykytilanteessa uudet jakaumamallit on estimoitava ensin, ennen kuin kerättävissä puustotunnuksissa voi

Taulukko 1. Puustotunnusten arviointivirheitä eri tutkimuksista (suluissa suhteelliset virheet). Käytetyt muuttujat: d_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta, PPA = pohjapinta-ala, h_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun pituus, RL = runkoluku, Ikä = pohjapinta-alamediaanipuun ikä ja V = keskitilavuus.

		Purola (1983)	Poso (1983)	Mähönen (1984)	Laasasenaho ja Päivinen (1986)	Pussinen (1992)	Pigg (1994)
d_{gM} (cm)	Harha			-1,0 (-4)	-1,0 (-4)		-0,8 (-4,8)
	Keskihajonta			2,4 (9)	2,2 (10)	3,4 (13,6)	2,5 (14,1)
PPA (m ² /ha)	Harha	-2,9 (-11,2)		-2,88 (-12)	-0,1 (-1)		0,2 (1,2)
	Keskihajonta	2,3 (10,9)		4,68	3,3 (16)		2,8 (18,5)
h_{gM} (m)	Harha	0,29 (1,6)		-0,04 (0)	-0,6 (-3)		-0,2 (-2)
	Keskihajonta	1,5 (7,8)		1,6	2,1 (11)	1,8 (10,8)	1,7 (14,1)
RL (r/ha)	Harha	-220 (-12,8)					
	Keskihajonta	301 (20,1)					540
Ikä (a)	Harha						
	Keskihajonta		12–21 (18–29)			8 (14)	15 (19)
V (m ³ /ha)	Harha						
	Keskihajonta		36–66 (29–38)		32–37 (17–24)	30 (16)	

tapahtua muutoksia. Läpimittajakaumat muodostetaan mittaustietojen mukaan puulajeittain ja -jaksoittain. Suomessa yleisesti käytössä olevien pohjapinta-alaan perustuvien läpimittajakaumien kuvauspuiden oletetaan esittävän kuvion puuston oikeaa jakaumaa. Kuvion tilavuustietojen laskennassa voidaan käyttää erilaisia puulajeittaisia jakaumamalleja (Maltamo ym. 2002a). Osalla jakaumamalleista voidaan hyödyntää mitattua runkolukua. Jakaumamallien toimivuutta ei ole kuitenkaan verrattu käytännön suunnitteluaineistolla, vaan aikaisemmissa tutkimuksissa on käytetty oikeita puustotunnuksia (mm. Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2000, Maltamo ym. 2002a, 2002b).

Kuvioittaista arviointia on usein arvosteltu menetelmän subjektiivisuuden vuoksi (esim. Poso 1994). Mikäli relaskoopikoealat sijoitettaisiin systemaattisesti kuviolle ja koealatiedot tallennettaisiin, saataisiin reaaliaikaista tietoa mitattujen puustotunnusten luotettavuudesta ja kuvion sisäisestä vaihtelusta (Pukkala 1990). Kuvioittaista arviointia ja sen kehitystä on käsitelty Koivuniemen (2003) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin metsiköihin ja paikannettuihin koealoihin perustuvaa kuvioittaista arviointia. Koealojen paikat metsikössä valittiin ensin subjektiivisesti, mutta koealojen tarkat paikat satunnaistettiin. Puustoltaan epätasaisissa metsiköissä käytettiin ositettua otantaa. Relaskoopikoealojen kaikki puut mitattiin, ja metsikkötunnusten estimoinnissa käy-

tettiin koealojen yhdistettyä empiiristä runkoluku-jakaumaa joko suoraan tai tasoitettuna.

Tilakohtaisen metsäsuunnittelun kustannuksia pyritään alentamaan jatkuvasti (Utterä ym. 2002). Koska maastoinventointi kattaa noin puolet suunnittelun kustannuksista, on sen tehostaminen katsottu merkittävimmäksi tekijäksi kustannusten alentamisessa (Utterä ym. 2002). Ainakin osittain voitaisiin siirtyä käyttämään kustannuksia vähentäviä metsävaratiedon hankintamenetelmiä, joita ovat mm. kaukokartoitusmenetelmät ja jatkuva ajantasaistus. Kaukokartoitusmenetelmiä ei ole kuitenkaan otettu käyttöön edes välialueiden inventointitiedon hankinnassa, koska välialueiden metsävaratiedon vaatimustasoa on pidetty tähän asti samana kuin alueiden, joille on tehty tilakohtainen suunnitelma. Kaukokartoitusmenetelmillä on toistaiseksi päästy tilavuuden osalta parhaimmillaan n. 15 %:n keskitilavuuteen (esim. Maltamo ym. 2004). Menetelmien etuna on lisäksi niiden objektiivisuus. Kaukokartoitusmenetelmien kehitystyössä on kuitenkin merkittävänä ongelmana toimenpidetarpeen määrittäminen, joka on vielä ratkaisematta. Toinen kustannuksia säästävä metsävaratiedon hankintamenetelmä on puustotunnusten ajantasaistus kasvumallien avulla ja tehdyt toimenpiteet päivittämällä joko ilmakuvilta tapahtuvalla tulokinnalla tai toimenpidekuvioekistereitä käyttämällä (Anttila 2002b, Hyvönen ja Korhonen 2003).

Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella suuren tar-

Taulukko 2. Puusto-ositteiden ja kuvioiden keskitunnukset tarkistusmittausaineistossa. Käytetyt muuttujat: n = kuvioiden/puusto-ositteiden lukumäärä, PPA = pohjapinta-ala, RL = runkoluku, Ikä = pohjapinta-alamediaanipuun ikä, V = keskitilavuus, V_{tukki} = tukkitilavuus, d_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta ja h_{gM} = pohjapinta-alamediaanipuun pituus.

		Mänty	Kuusi	Koivu	Muut lehtipuut	Kuvio
n	Lukumäärä	1095	873	865	868	1162
PPA (m ² /ha)	Minimi	0,1	0,1	0,1	0,1	1,5
	Maksimi	29,1	35,8	23,1	7,2	40,8
	Keskiarvo	12,6	8,0	2,6	0,5	20,2
	Keskihajonta	6,9	8,9	3,4	0,6	6,4
RL (r/ha)	Minimi	4	6	5	5	54
	Maksimi	2816	3216	2587	826	3417
	Keskiarvo	683,2	363,6	226,3	59,8	1133,2
	Keskihajonta	539,5	362,8	295,8	75,9	538,0
Ikä (a)	Minimi	1	1	1	1	1
	Maksimi	179	134	145	136	179
	Keskiarvo	47,7	43,7	35,2	48,1	47,9
	Keskihajonta	28,3	25,9	22,6	27,3	27,9
V (m ³ /ha)	Minimi	0,4	0,3	0,4	0,3	8,5
	Maksimi	284,0	408,2	199,2	63,9	447,4
	Keskiarvo	92,5	67,3	17,9	3,2	153,4
	Keskihajonta	59,6	87,6	25,5	4,7	78,3
V_{tukki} (m ³ /ha)	Minimi	0	0	0	0	0
	Maksimi	200,6	298,2	105,3	19,8	300,8
	Keskiarvo	29,8	31,7	2,7	0,3	54,1
	Keskihajonta	39,9	54,9	7,5	1,2	63,4
d_{gM} (cm)	Minimi	7,1	4,8	4,8	4,5	7,5
	Maksimi	44,6	45,1	48,6	50,4	42,6
	Keskiarvo	19,8	17,4	15,2	13,7	19,0
	Keskihajonta	6,6	6,8	6,5	6,7	5,7
h_{gM} (m)	Minimi	3,8	3,6	3,0	0,7	4,3
	Maksimi	33,1	32,9	31,7	34,9	31,9
	Keskiarvo	15,3	14,0	14,2	11,2	15,2
	Keskihajonta	5,0	6,0	5,3	5,1	5,1

kistusmittausaineiston avulla nykyisen puusto-ositteittain kerättävän kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta. Tutkimuksessa selvitetään, millainen tarkkuus kuvioittaisella arvioinnilla on erilaisissa koh-teissa. Lisäksi tutkitaan mittaajien välistä vaihtelua. Saatuja tuloksia vertaillaan neljällä erillisellä tarkistusmittausaineistolla. Tutkimus antaa lisätietoa siitä, missä määrin kuvioittaisen arvioinnin tarkkuus voi vaihdella. Tällä on merkitystä metsävaratietojen laadun arvioinnissa, kuvioittaisen arvioinnin kehitystyössä, laskennallisen ajantasaistuksen tutkimisessa

ja korvaavien/täydentävien inventointimenetelmien, esimerkiksi kaukokartoituksen, evaluoinneissa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Tutkimusaineisto

Tutkimuksen aineisto oli pääosin Pohjois-Karjalan, Pohjois-Savon, Etelä-Savon ja Kainuun metsäkes-

kuksien alueilta. Aineisto kerättiin vuosina 1997 ja 1998. Kullekin tutkimusaineiston kuviolle suoritettiin kuvioittainen arviointi ja tarkistusmittaus saman vuoden aikana. Varsinainen kuvioittainen arviointi suoritettiin SOLMU-muotoisena, ja tässä arvioinnissa mittaajille annettiin ohjeeksi kiinnittää erityistä huomiota puustojaksojen erottamiseen. Tarkistusmittauksella pyrittiin seuraamaan eri suunnitteluorganisaatioiden työntekijöiden työnlaatua suoritetussa kuvioittaisessa arvioinnissa (Tarkistusinventoinnin maastotyöohje... 1998).

Tarkistusmittauksessa kultakin suunnittelijalta pyrittiin mittaamaan kullakin tarkistuskerralla 10 kuviota (Tarkistusinventoinnin maastotyöohje... 1998). Kunkin suunnittelijan luona pyrittiin käymään 2–4 kertaa. Suunnittelijoihin otettiin yhteyttä ennen tarkistusta ja suunnittelijan läsnäolo sallittiin tarkistuksessa. Palaute tarkistusmittauksesta toimitettiin suunnittelijoille kunkin tarkistuskerran jälkeen, kun tulokset saatiin laskettua. Kummankin mittaavuoden alussa suunnittelijoilla oli kahden päivän koulutus- ja palautetilaisuus, jossa edellisen vuoden tulokset käytiin läpi ja tulosten pohjalta suunniteltiin uutta mittauskautta.

Tarkistusmittauksessa kullekin tarkastettavalle kuviolle laadittiin systemaattinen koealaverkko, jonka koealojen lukumäärä ja koko määräytyivät kuvion pinta-alan, puuston kehitysluokan ja ositteiden lukumäärän mukaan. Koealan säde oli keskimäärin 7,5 metriä nuorissa, varttuneissa ja uudistuskypsissä metsiköissä säteen vaihdellessa 5,64 metristä 10 metriin. Kuviolle tuli keskimäärin 6,2 ympyräkoelaa. Puustotunnukset mitattiin koealoilta elektronisten saksien avulla ja muut kuviotiedot kerättiin maastotallentimella. Varttuneissa kasvatusmetsissä (kehitysluokissa 03) ja uudistuskypsissä metsiköissä (kehitysluokka 04) luettiin kaikki koealan puut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli vähintään 7 cm. Lisäksi koealalta luettiin rinnankorkeusläpimitaltaan vähintään 5 cm olevat puut, mikäli alikasvoksella katsottiin olevan merkitystä kasvatettavana puustona. Nuorissa kasvatusmetsissä (kehitysluokka 02) luettiin kaikki puut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli vähintään 5 cm. Läpimitat mitattiin yhden millimetrin tarkkuudella. Tarkistuskuvion pituuskoepuuna mitattiin vähintään kolmelta koealalta kunkin puulajiositteen pohjapinta-alamediaanipuu. Lisäksi kunkin puulajiositteen esiintyessä ensimmäisen ker-

Taulukko 3. Vertailuaineistojen kuvioiden keskitunnuksia. Merkinnät kuten taulukossa 2.

	Suonenjoki	Leppävirta	Mikkeli	Kontiolahti
n	40	21	26	29
d_{gM} (cm)	24,3	22,3	23,6	23,1
h_{gM} (m)	20,2	18,2	18,7	17,3
PPA (m ² /ha)	20,5	23,3	24,8	26,3
V (m ³ /ha)	197,2	206,9	220,9	219,4

ran sen keskipuun pituus mitattiin. Näin varmistettiin, että tarkistuskuvion jokaisesta puusto-ositteesta mitattiin vähintään yksi pituuskoepuu. Pituudet mitattiin yhden desimetrin tarkkuudella. Pituuskoepuista mitattiin myös ikä. Taimikkokoealoilta mitattiin puulajiositteiden runkoluku sekä aritmeettinen keskiläpimitta ja keskipituus. Taimikkokoealojen säde oli 3,99 m (Tarkistusinventoinnin maastotyöohje... 1998).

Tarkistusmittausaineistoa käsiteltiin kahtena osana: 1) kuvioaineisto (nuoret ja varttuneet kasvatusmetsät ja uudistuskypsät metsät) ja 2) taimikkoaineisto (kehitysluokkaa T1 tai T2 olevat kuviot). Kuvioaineisto käsitti 1 162 kuviota, joista kangasmaan kuviota oli 991, rämeitä 96 ja korpia 75 (taulukko 2). Taimikkoaineisto käsitti puolestaan 242 kuviota, joiden puustotunnusten keskiarvoja on esitelty tulosten yhteydessä luvussa 3.1. Kuvioaineistossa kuvion keskimääräinen pinta-ala oli 2,43 hehtaaria ja taimikkoaineistossa 2,66 hehtaaria.

Tutkimuksessa käytettiin lisäksi neljää erillistä tarkistusmittausaineistoa vertailuaineistona. Näistä kolmessa aineistossa tarkistusmittaukset oli tehty systemaattisella ympyräkoelaverkolla. Yhdessä vertailuaineistossa koealat olivat relaskooppikoelaloja. Vertailuaineistoissa koealojen lukumäärä metsiköittäin vaihteli välillä 6–10. Aineistojen puustotietojen keskiarvoja on esitetty taulukossa 3.

2.2 Menetelmät

Tarkistusmittausaineiston kunkin kuvion koealojen runkolukusarjat yhdistettiin ja koealojen yhteispinta-alan avulla laskettiin hehtaariohittaiset runkolukusarjat kuviolle. Lukupuiden pituudet ennustettiin Veltheimin (1987) pituusmalleilla. Malleilla ennu-

tettuja pituuksia kalibroitiin puusto-ositteittain kertomalla pituusestimaatit puusto-ositteen pituuskoepuiden mitattujen ja estimoitujen pituuksien suhteella. Kuvion hehtaariohjeita tilavuudet saatiin estimoidulla kullekin mitatulle puulle tilavuus ja kertomalla saadut tilavuudet mitatun puun edustamalla runkoluvulla. Kuvion ja puulajiositteiden ”oikeat” keskitunnukset (esimerkiksi keskipituus ja keskilämpömitta) laskettiin mitatusta runkolukusarjasta. Mitatusta runkolukusarjasta muodostettiin kuviolle myös SOLMU-muotoinen kuvioaineisto.

Suunnittelijan keräämien metsikkö- ja puustotunnusten avulla ennustettiin kullekin puusto-ositteelle Weibull-jakaumamalleilla (Mykkänen 1986, Kilki ym. 1989) teoreettinen pohjapinta-alajakauma, jonka kuvauspuulle saatiin tilavuusennusteet MELA-ohjelmistolla (Redsven ym. 2002). Tarkastellut tukki- ja kuitutilavuudet olivat teoreettisia sekä tarkistusmittausaineistossa että suunnittelijan aineistossa. Tukki- ja kuitutilavuuden huomioivat tukki- ja kuitutilavuudet ennustettiin käyttäen MELAssa käytössä olevia Mehtälön (2002) tukki- ja kuitutilavuusmalleja.

Metsikkötunnusten luotettavuutta arvioitiin keskivirheen (RMSE) ja harhan avulla. Käsiteltäviä puustotunnuksia olivat puulajeittaiset ja metsiköittäiset keskilämpömitta, keskipituus, ikä, pohjapinta-ala, keskitilavuus sekä tukki- ja kuitutilavuus. Taimikkokuviot erotettiin omaksi aineistoksi, jota käsiteltiin erikseen. Taimikoissa tarkasteltiin alkuperäisiä mittauksia eikä MELA-ohjelmistolla laskettuja summatunnuksia. Taimikkoaineistossa tutkittiin mm. runkoluvun ja keskilämpömittan arvioinnin luotettavuutta.

Tarkistusmittausaineiston puustotunnusten arvioinnin luotettavuutta tarkasteltiin myös ositteittain. Tarkistusmittausaineisto jaettiin kasvupaikan, metsätyypin, kehitysluokan ja pääpuulajin mukaan ja tarkasteltiin ositteiden välistä vaihtelua.

Mittaajien välistä vaihtelua tutkittiin graafisesti arvioijilla, joilta oli tarkistettu vähintään 20 kuviota. Lisäksi mitaajien välistä vaihtelua tutkittiin varianssikomponenttimalleilla, jotka laadittiin R-tilasto-ohjelmiston lme-aliohjelmalla (A language... 2004). Aineistosta muodostettiin kokonaispohjapinta-alalle ja keskilämpömittalle malleja, joissa selitettävänä muuttujana oli puustotunnuksen arviointivirheen neliö, joka kuvaa arviointivirheen varianssia (kaava 1).

$$y_k = x_k + m_{ik} + e_{ik} \quad (1)$$

missä

y_k = puustotunnuksen k arviointivirheen neliö

x_k = mallin kiinteän osan selittäjä

m_{ik} = mitaajaa i kuvaava satunnainen tekijä puustotunnuksella k

e_{ik} = mallin jäännösvirhe

Mallien kiinteän osan selittäjinä käytettiin metsikön puustoa kuvaavia tunnuksia, kuten pohjapinta-alaa, keskilämpömittaa ja -pituutta ja metsikön puulajien lukumäärää. Lisäksi mallien kiinteässä osassa kehitettiin kehitysluokkia dummy-muuttujina. Varianssikomponenttimallit laadittiin myös erikseen eri kehitysluokille. Varianssikomponenttimalleja laadittiin myös pohjapinta-alan ja keskitilavuuden virheelle eli harhalle. Mitaaajan vaikutus puustotunnuksen arviointivirheeseen huomioitiin mallien satunnaisosan varianssikomponenttina, jolloin se osa, jota laadittujen mallien kiinteät osat eivät selittäneet, jakaantui mitaajien väliseen vaihteluun ja jäännösvaihteluun. Varianssikomponenttianalyysiin otettiin mukaan kaikki ne arvioijat (54 kpl), joilta oli tarkistettu vähintään 10 kuviota.

Tarkistusmittausaineiston koelamat kerättiin otannalla, jolloin saatuihin tuloksiin sisältyy sekä kuvioittaisen arvioinnin virhettä että tarkistusmittauksen koelamittausten virhettä. Koelamittausten virhe koostuu pääosin otantavirheestä, mutta lisäksi siihen liittyy myös mitausvirhettä. Kun kuvioittaisen arvioinnin virheet ja koelamittausten virheet oletettiin riippumattomiksi toisistaan, voitiin koelamittausten virheen vaikutusta tutkia laskemalla kullekin kuvion puustotunnukselle G koelajien välisestä vaihtelusta keskiarvon keskivirheen neliö (kaava 2), ja vähentämällä se kuvioittaisen arvioinnin ja koelamittausten erotuksen varianssista (kaava 3). Koko aineiston arviointivirheen varianssi saadaan summaamalla kuvioittaiset arviointivirheiden varianssit.

$$S_{oi}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (G_{ij} - \bar{G}_i)^2}{n_i - 1} / n_i \quad (2)$$

$$S_{ai}^2 = S_{ki}^2 - S_{oi}^2 \quad (3)$$

missä

S_{oi}^2 = kuvion i puustotunnuksen G tarkistusmittauskoealojen otantavirhe ja mittausrvirhe

\bar{G}_{ij} = kuvion i puustotunnuksen G arvo koealalla j

\bar{G}_i = kuvion i puustotunnuksen G koealojen keskiarvo

n_i = koealojen lukumäärä kuviolla i

S_{ai}^2 = kuvion i puustotunnuksen G arviointivirheen varianssi

S_{ki}^2 = kuvion i puustotunnuksen G kuvioittaisella arvioinnilla saadun estimaatin ja tarkistusmittauksissa saadun estimaatin erotuksen varianssi

Mittaajakohtaisissa tarkasteluissa tarkistusmittauksen koealamittausten virheet laskettiin mittaajittain.

Tarkistusmittausaineistossa vertailtiin myös erilaisten läpimittajakaumamallien käyttöä kuvauspuiden muodostuksessa. Kuvauspuut muodostettiin Weibull-jakaumamallien (Mykkänen 1986, Kilkki ym. 1989) lisäksi runkoluvuttomilla prosentiosuusmalleilla (Kangas ja Maltamo 2000) ja Johnsonin S_B -jakaumamalleilla (Siipilehto 1999). Koska suunnittelijat eivät mitanneet runkolukua muilta kuin taimikkokuvioilta, runkoluvullisten jakaumamallien (Siipilehto 1999, Kangas ja Maltamo 2000) testaamiseksi puusto-ositteiden runkoluku generoitiin kahdella tavalla: 1) käytettiin ns. keskipuuta, jolloin runkoluku tuotettiin suunnittelijan puustotiedoista jakamalla puusto-ositteen pohjapinta-ala pohjapinta-alamediaanipuun pohjapinta-alalla ja 2) laadittiin tarkistusmittausaineistossa puulajeittaiset mallit puusto-ositteen runkoluvulle ja ennustettiin näillä malleilla runkoluvut puusto-ositteille käyttäen sellittäjinä suunnittelijan keräämiä kuvio- ja puusto-ositetietoja.

Erillisissä neljässä vertailuaineistoissa selvitettiin kussakin kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus, ja aineistojen rakennetta ja virhetasoa verrattiin tutkimuksessa käytettyyn laajaan tarkistusmittausaineistoon. Lisäksi kustakin neljästä vertailuaineistosta valittiin kehitysluokan ja pääpuulajin mukaan luokkia, joissa oli eniten kuvioita, ja verrattiin näiden luokkien luotettavuutta laajan tarkistusmittausaineiston vastaaviin luokkiin. Tarkistusmittausten otantavirhettä eikä mittaustarkkuutta huomioitu tässä tarkastelussa, vaan niiden vaihtelun oletettiin olevan pientä eri aineistojen välillä.

3 Tulokset

3.1 Puustotunnusten luotettavuus

Kuvioittaisen arvioinnin puustotunnusten arviointivirheiden luotettavuutta tutkittiin laajalla tarkistusmittausaineistolla. Kuvion suhteelliseksi keskitilavuuden keskivirheeksi tuli 24,8 % (37,5 m³/ha) (taulukko 4). Puustotunnukset määritettiin tarkimmin männyllä. Kuusen ja koivun puusto-ositteiden pohjapinta-alat aliarvioitiin. Suurin aliarvio oli kuusella, jonka pohjapinta-alan harha oli 9,6 %. Männyn pohjapinta-ala puolestaan yliarvioitiin 3,4 %. Kuviotasolla keskiläpimitta aliarvioitiin 2,4 % (0,4 cm) ja pohjapinta-ala 2,7 % (0,5 m²/ha). Kuvion keskitilavuus aliarvioitiin 1,6 % (2,4 m³/ha).

Kuvioaineisto jaettiin pääryhmän mukaan kankaisiin, korpiin ja rämeisiin. Puustotunnusten keskivirheet eivät poikenneet kovinkaan paljon pääryhmien kesken (taulukko 5). Soilla keski-ään ja pohjapinta-alan määrittäminen oli jonkin verran vaikeampaa kuin kankailla. Lisäksi soilla vallitsevan puulajin (korvilla kuusi ja rämeillä mänty) puustotunnusten virheet olivat selvästi pienempiä kuin sivupuupuu-lajien. Korvilla kuvion keskipituudet yliarvioitiin 2,3 % ja rämeillä 2,2 %. Kuitenkin korvilla keskitilavuudesta tuli aliarvio, koska pohjapinta-ala aliarvioitiin. Korvilla valtaapuulajina olleen kuusen pohjapinta-ala aliarvioitiin selvästi (12,8 %). Rämeillä keskitilavuus yliarvioitiin 1,5 % (1,4 m³/ha).

Puustotunnusten luotettavuutta tarkasteltiin myös kehitysluokittain. Puustotunnusten suhteelliset keskivirheet pienenevät siirryttäessä nuorista kasvatusmetsistä uudistuskypsien metsiin (taulukko 6). Samalla absoluuttiset keskivirheet kasvoivat. Esimerkiksi keskitilavuuden absoluuttinen keskivirhe oli kaksinkertainen uudistuskypsillä metsiköillä verrattuna nuoriin kasvatusmetsiköihin, mutta suhteellinen keskivirhe oli noin 4,5 %-yksikköä pienempi uudistuskypsissä metsiköissä. Puustotunnusten harhat erosivat toisistaan kehitysluokittain: pohjapinta-alan harha muuttui puuston kehityksen myötä nuorten metsiköiden 0,8 %:n yliarviosta uudistuskypsien metsiköiden 9,0 %:n aliarvioon. Ikä aliarvioitiin nuorissa metsissä ja yliarvioitiin uudistuskypsissä metsiköissä. Keskitilavuudesta saatiin pieni yliarvio kehitysluokissa 02 ja 03 sekä selvä aliarvio uudistuskypsissä metsissä.

Taulukko 4. Puusto-ositteiden ja kuvioiden puustotunnusten keskiarvot (RMSE) ja harhat tarkistusmittausaineistossa (suluisissa suhteelliset keskiarvot ja harhat). Tarkistusmittausten otantavirhettä ei ole huomioitu, kts. taulukko 9. Merkinnot kuten taulukossa 2.

	Mänty	Kuusi	Koivu	Kuvio
Keskiarvot				
d_{gM} (cm)	3,0 (16,2)	4,1 (21,6)	4,6 (28,1)	2,3 (12,6)
h_{gM} (m)	2,2 (15,0)	3,8 (24,0)	3,5 (23,8)	2,4 (15,7)
PPA (m ² /ha)	3,9 (28,4)	4,4 (43,3)	2,1 (58,3)	3,9 (19,6)
Ikä (a)	12,4 (21,7)	17,0 (27,2)	16,0 (33,1)	15,9 (28,2)
V (m ³ /ha)	30,4 (29,3)	39,7 (43,0)	16,4 (65,0)	37,5 (24,8)
V_{tukki} (m ³ /ha)	16,9 (52,0)	27,2 (62,3)	4,9 (135,6)	23,6 (44,6)
V_{kuitu} (m ³ /ha)	20,8 (30,8)	20,3 (43,5)	12,9 (65,7)	25,1 (27,0)
Harha				
d_{gM} (cm)	0,9 (5,0)	0,6 (3,1)	-0,3 (-1,8)	0,4 (2,4)
h_{gM} (m)	0,2 (1,1)	0,1 (0,5)	0,01 (0,1)	-0,01 (-0,05)
PPA (m ² /ha)	-0,5 (-3,4)	1,0 (9,6)	0,2 (4,7)	0,5 (2,7)
Ikä (a)	-0,9 (-1,5)	0,5 (0,9)	-2,2 (-4,5)	0,5 (0,9)
V (m ³ /ha)	-5,7 (-5,5)	4,1 (4,4)	1,5 (5,7)	2,4 (1,6)
V_{tukki} (m ³ /ha)	-1,0 (-3,0)	2,4 (5,5)	0,7 (19,0)	1,2 (2,3)
V_{kuitu} (m ³ /ha)	-4,6 (-6,7)	1,3 (2,7)	0,3 (1,3)	0,3 (0,3)

Taulukko 5. Kuvion puustotunnusten keskiarvot (RMSE) ja harhat pääryhmän mukaan jaoteltuna tarkistusmittausaineistossa (suluisissa suhteelliset keskiarvot ja harhat).

	Kangas	Korpi	Räme
Keskiarvot			
Lukumäärä	991	75	96
d_{gM} (cm)	2,4 (12,5)	2,3 (12,5)	2,2 (14,4)
h_{gM} (m)	2,4 (15,3)	2,8 (18,3)	2,3 (19,7)
PPA (m ² /ha)	3,8 (18,7)	5,1 (25,7)	3,7 (23,9)
Ikä (a)	14,8 (26,2)	24,1 (38,9)	18,9 (36,9)
V (m ³ /ha)	37,9 (24,2)	41,3 (27,4)	29,3 (30,8)
V_{tukki} (m ³ /ha)	24,5 (43,1)	22,4 (46,9)	12,3 (76,4)
Harha			
d_{gM} (cm)	0,5 (2,6)	0,4 (2,0)	-0,03 (-0,2)
h_{gM} (m)	0,04 (0,3)	-0,4 (-2,3)	-0,3 (-2,2)
PPA (m ² /ha)	0,4 (2,2)	2,3 (11,2)	0,1 (0,6)
Ikä (a)	-0,2 (-0,4)	6,1 (9,8)	3,8 (7,4)
V (m ³ /ha)	2,1 (1,3)	11,4 (7,6)	-1,4 (-1,5)
V_{tukki} (m ³ /ha)	1,1 (1,9)	4,9 (10,4)	0,2 (1,3)

Taulukko 6. Kuvion puustotunnusten keskiarvot (RMSE) ja harhat kehitysluokan mukaan jaoteltuna tarkistusmittausaineistossa (suluisissa suhteelliset keskiarvot ja harhat).

	02	03	04
Keskiarvot			
Lukumäärä	416	444	298
d_{gM} (cm)	1,9 (15,0)	2,2 (11,4)	2,4 (9,4)
h_{gM} (m)	2,0 (19,3)	2,5 (15,3)	2,7 (13,1)
PPA (m ² /ha)	3,4 (20,5)	3,8 (18,3)	4,5 (19,9)
Ikä (a)	9,6 (28,2)	14,7 (26,8)	22,9 (25,4)
V (m ³ /ha)	25,9 (27,6)	36,6 (22,9)	50,5 (23,1)
V_{tukki} (m ³ /ha)	6,3 (175,7)	22,4 (47,5)	36,9 (28,2)
Harha			
d_{gM} (cm)	0,9 (6,7)	0,1 (0,6)	0,2 (0,8)
h_{gM} (m)	0,2 (1,5)	-0,3 (-1,8)	0,1 (0,6)
PPA (m ² /ha)	-0,1 (-0,8)	0,1 (0,7)	2,0 (9,0)
Ikä (a)	1,1 (3,3)	0,9 (1,7)	-1,4 (-1,5)
V (m ³ /ha)	-1,0 (-1,1)	-3,0 (-1,8)	15,2 (6,9)
V_{tukki} (m ³ /ha)	1,1 (31,4)	0,2 (0,3)	3,1 (2,4)

Taulukko 7. Kuvion puustotunnusten keskivirheet (RMSE) ja harhat tarkistusmitausaineistossa jaoteltuna mänty-, kuusi- ja lehtipuumetsiin sekä sekametsiin (suluissa suhteelliset keskivirheet ja harhat).

	Mäntymetsä	Kuusimetsä	Lehtipuumetsä	Sekametsä
Keskivirhe				
Lukumäärä	657	196	17	290
d_{gM} (cm)	2,0 (11,8)	2,4 (10,7)	1,7 (11,7)	2,5 (13,3)
h_{gM} (m)	2,1 (15,2)	2,8 (14,9)	1,6 (10,4)	2,7 (16,9)
PPA (m^2/ha)	3,2 (17,2)	4,7 (20,0)	3,6 (20,0)	4,6 (23,0)
Ikä (a)	12,1 (23,1)	23,3 (32,7)	7,2 (22,1)	17,5 (30,8)
V (m^3/ha)	29,0 (21,9)	52,8 (24,9)	28,0 (22,1)	42,5 (27,5)
V _{tukki} (m^3/ha)	16,2 (43,8)	39,3 (37,0)	10,9 (88,0)	24,1 (43,5)
V _{kuitu} (m^3/ha)	21,6 (24,0)	30,6 (29,8)	22,3 (21,7)	28,3 (30,4)
Harha				
d_{gM} (cm)	0,4 (2,5)	0,5 (2,2)	0,6 (4,5)	0,3 (1,7)
h_{gM} (m)	0,03 (0,2)	0,1 (0,5)	0,02 (0,1)	-0,2 (-1,3)
PPA (m^2/ha)	-0,3 (-1,4)	2,1 (9,1)	1,2 (6,8)	1,2 (6,2)
Ikä (a)	0,05 (0,1)	0,2 (0,2)	1,1 (3,3)	1,6 (2,8)
V (m^3/ha)	-4,1 (-3,1)	18,3 (8,6)	8,7 (6,9)	6,1 (3,9)
V _{tukki} (m^3/ha)	-1,6 (-4,2)	10,4 (9,8)	2,5 (19,9)	1,4 (2,4)
V _{kuitu} (m^3/ha)	-3,1 (-3,4)	6,2 (6,0)	6,9 (6,7)	3,5 (3,7)

Puustotunnusten arvioinnin luotettavuutta tarkasteltiin myös jakamalla kuvioaineisto pääpuulajin mukaan mänty-, kuusi- ja lehtipuumetsiin sekä sekametsiin. Metsikkö luokiteltiin sekametsäksi, jos pääpuulajin osuus oli alle 70 %. Suunnittelijat arvioivat puustotunnukset luotettavimmin männiköissä (taulukko 7). Sitä vastoin kuusikoissa puustotunnusten absoluuttiset virheet olivat suurimmillaan. Suhteelliset virheet olivat suurimmillaan sekametsissä. Pääpuulajin keskitilavuuden keskivirhe oli männiköissä 23,6 % (29,7 m^3/ha), kuusikoissa 28,4 % (52,9 m^3/ha) ja lehtimetsissä 21,0 % (23,3 m^3/ha). Kokonaispohjapinta-alan harha oli pienimmillään männiköissä 1,4 %:n yliarvio ja suurimmillaan kuusikoissa 9,1 %:n yliarvio. Sekä kuusikoiden että lehtimetsien tilavuus aliarvioitiin selvästi, kun taas männiköissä puuston tilavuudesta saatiin pieni yliarvio.

Puustotunnusten luotettavuutta arvioitiin myös jakamalla kuvioaineisto kasvupaikkaluokan mukaan ositteisiin. Keskipituuden ja -läpimitan keskivirheet olivat melko samansuuruisia eri kasvupaikkaluokissa (taulukko 8). Sitä vastoin pohjapinta-alan keskivirhe oli sitä suurempi mitä rehevämpi ja samalla

runsaspuustoisempi kasvupaikka oli. Pohjapinta-ala aliarvioitiin rehevimmillä kasvupaikoilla ja yliarvioitiin karummilla kasvupaikoilla. Harha oli selvästi suurimmillaan lehtomaisilla kankailla aliarvion ollessa 12,4 % (2,8 m^2/ha). Keskitilavuuden harha oli pienimmillään kuivilla kankailla -3,1 % (-2,8 m^3/ha) ja suurimmillaan runsaspuustoisilla lehtomaisilla kankailla 12,5 % (25,8 m^3/ha).

Kuvion keskitilavuuden vaikutusta keskitilavuuden arviointivirheeseen tarkasteltiin myös visuaalisesti. Keskitilavuudeltaan pienimmillä kuvioilla oli pieni systemaattinen yliarvio (kuva 1). Kuvion tilavuuden suuretessa jo tilavuusluokan 150–200 m^3/ha metsiköiden tilavuus aliarvioitiin 3,6 m^3/ha , ja kuvion tilavuuden kasvaessa tästä eteenpäin keskitilavuudesta tuli yhä enemmän yliarvio. Tilavuudeltaan yli 300 m^3/ha kuvioilla tilavuus aliarvioitiin selvästi harvaa poikkeusta lukuunottamatta.

Kun pohjapinta-alan arvioimisvirhettä tarkasteltiin pohjapinta-alan mukaan, huomattiin, että pienillä pohjapinta-aloilla tulee pieni yliarvio (kuva 2). Yliarvio oli suurimmillaan 2,0 m^2/ha luokassa 0–10 m^2/ha . Pohjapinta-alasta saatiin aliarvio luokasta 20–25 m^2/ha lähtien. Pohjapinta-alan kasvaessa

Taulukko 8. Kuvion puustotunnusten keskvirheet (RMSE) ja harhat tarkistusmittausaineistossa jaoteltuna kasvupaikkaluokan mukaan (suluissa suhteelliset keskvirheet ja harhat).

	Lehtomaiset kankaat ja lehdot	Tuoreet kankaat	Kuivahkot kankaat	Kuivat kankaat
Keskivirhe				
Lukumäärä	83	532	481	66
d_{gM} (cm)	2,6 (12,1)	2,6 (13,0)	2,1 (12,1)	1,7 (11,4)
h_{gM} (m)	2,6 (14,0)	2,6 (15,8)	2,2 (15,8)	1,9 (16,4)
PPA (m ² /ha)	5,1 (22,3)	4,1 (19,2)	3,5 (19,3)	2,4 (16,3)
Ikä (a)	19,9 (32,9)	17,6 (29,7)	12,5 (23,2)	18,2 (37,6)
V (m ³ /ha)	55,7 (27,1)	41,6 (24,2)	30,0 (23,8)	18,1 (20,1)
V _{tukki} (m ³ /ha)	43,3 (46,6)	25,8 (37,4)	16,6 (48,9)	8,4 (73,0)
V _{kuitu} (m ³ /ha)	31,9 (29,6)	26,9 (27,3)	22,6 (26,0)	16,1 (22,3)
Harha				
d_{gM} (cm)	1,3 (6,2)	0,5 (2,6)	0,2 (1,2)	0,5 (3,4)
h_{gM} (m)	0,1 (0,6)	0,05 (0,3)	-0,1 (-1,0)	0,3 (2,5)
PPA (m ² /ha)	2,8 (12,4)	1,2 (5,5)	-0,4 (-2,4)	-0,5 (-3,3)
Ikä (a)	0,2 (0,3)	0,6 (0,9)	0,7 (1,3)	-0,9 (-1,8)
V (m ³ /ha)	25,8 (12,5)	6,9 (4,0)	-5,9 (-4,7)	-2,8 (-3,1)
V _{tukki} (m ³ /ha)	20,0 (21,6)	1,8 (2,6)	-2,4 (-7,0)	-0,3 (-2,2)
V _{kuitu} (m ³ /ha)	5,0 (4,6)	4,1 (4,1)	-4,2 (-4,9)	-2,7 (-3,8)

Taulukko 9. Tarkistusmittausaineiston otantavirheen vaikutus kuvion puustotunnusten keskvirheisiin.

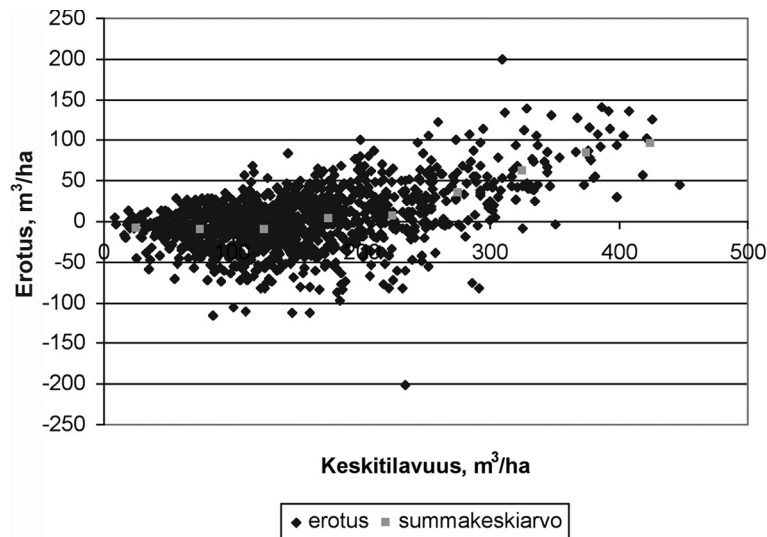
	Keskvirhe, % Otantavirhettä ei ole huomioitu	Keskvirhe, % Otantavirhe huomioitu	Keskvirhe, abs Otantavirhettä ei ole huomioitu	Keskvirhe, abs. Otantavirhe huomioitu
d_{gM} (cm)	12,6	10,4	2,3	1,9
h_{gM} (m)	15,7	15,0	2,4	2,3
PPA (m ² /ha)	19,6	16,0	3,9	3,2
V (m ³ /ha)	24,8	21,4	37,5	32,3
V _{tukki} (m ³ /ha)	44,5	37,7	23,6	20,0
V _{kuitu} (m ³ /ha)	27,0	24,0	25,1	22,4

aliarvio suureni nopeasti, ja systemaattinen virhe oli jo luokassa 30–35 m²/ha 5,9 m²/ha ja tästä ylöspäin 8,0 m²/ha.

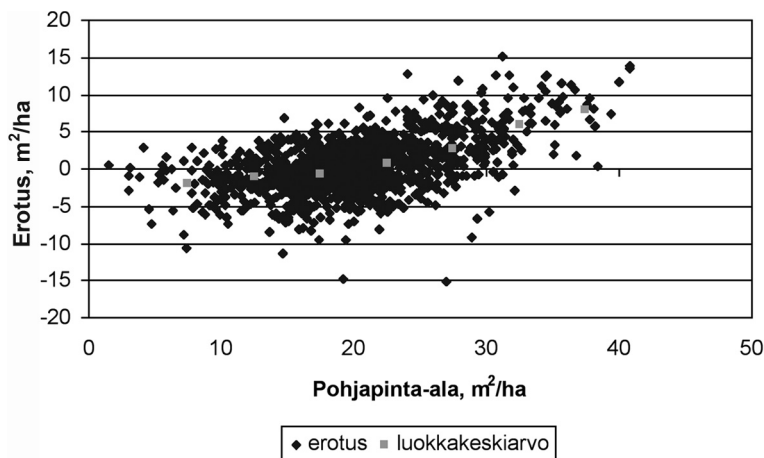
Edellä olevissa tuloksissa on mukana myös tarkistusmittauksen virhe. Kun tarkistusmittauksen otanta- ja mittausvirhe vähennetään kuvioittaisen arvioinnin virheestä, keskitilavuuden keskvirhe pienenee 24,8 %:sta 21,4 %:iin (taulukko 9). Tarkistusmittauksen virhe huomioituna keskitilavuuden keskvirhe pieneni mänyllä 29,3 %:sta 21,7 %:iin, kuu-

sella 43,0 %:sta 37,6 %:iin ja koivulla 65,0 %:sta 55,8 %:iin.

Kuvion koelajojen välinen vaihtelu vaikutti puustotunnusten arvioinnin luotettavuuteen: mitä suurempi hajonta puustotunnuksella kuviolla oli, sitä vaikeampaa oli puustotunnuksen arviointi. Korrelaatiot puustotunnuksen virheen ja tunnuksen kuvion koelajojen välisen hajonnan välillä olivat tilastollisesti merkittäviä ainakin keskiläpimitan ja pohjapinta-alan osalta (keskiläpimita 0,221, keskipituus



Kuva 1. Kuvion keskitilavuuden mittausvirhe (todellinen-arvioitu) keskitilavuuden funktiona. Kuvassa lisäksi luokkakeskisarvot.



Kuva 2. Kuvion pohjapinta-alan mittausvirhe (todellinen-arvioitu) pohjapinta-alan funktiona. Kuvassa lisäksi luokkakeskisarvot.

0,066 ja pohjapinta-ala 0,225 (absoluuttiset virheet: keskiläpimitta 0,349, keskipituus 0,178 ja pohjapinta-ala 0,234)). Myös keskitilavuuden arviointivirhe kasvoi kuvion koalojen välisen hajonnan kasvaessa korrelaation ollessa 0,307 (absoluuttinen 0,381).

Kuvion koon vaikutus keskitilavuuden ja pohjapinta-alan virheeseen vaihteli kuvion pohjapinta-ala- ja keskitilavuusluokan mukaan. Esimerkiksi

tilavuusluokassa 100–200 m³/ha kuvion pinta-alan lisääntyminen yhdellä hehtaarilla kasvatti keskitilavuuden suhteellista virhettä 0,41 %-yksikköä ja tilavuusluokassa 200–300 m³/ha kuvion pinta-alan lisääntyminen yhdellä hehtaarilla vähensi suhteellista virhettä 1,1 %-yksikköä. Kuvion koon ja keskitilavuuden sisäisen hajonnan välinen korrelaatio oli vähäinen (–0,09). Kuvion pinta-alan ja pohja-

Taulukko 10. Kuvion ja puusto-ositteen puustotunnusten tosiarvojen (var(tosi)) ja mittaajien arvioimien arvojen (var(arvioitu)) varianssi, varianssien korrelaatiot tunnuksen arviointivirheen kanssa sekä luokitus virhetyypin mukaan.

	Var (tosi)	Var (arvioitu)	Korrelaatio (virhe, tosi)	Korrelaatio (virhe, arvioitu)	Virhetyyppi
PPA, kuvio	40,5	29,4	0,53	-0,09	Berkson
d _{gM} , kuvio	32,5	33,7	0,16	-0,24	Yhdistelmä
h _{gM} , kuvio	25,9	22,3	0,38	-0,10	Berkson
Ikä, kuvio	696,0	795,6	0,18	-0,39	tavallinen
PPA, pääpuulaji	28,1	31,1	0,35	-0,46	Yhdistelmä
d _{gM} , pääpuulaji	33,1	34,0	0,17	-0,23	Yhdistelmä
h _{gM} , pääpuulaji	25,1	21,9	0,37	-0,09	Berkson
Ikä, pääpuulaji	725,6	728,3	0,23	-0,23	Yhdistelmä
PPA, vallittu	2,3	3,0	0,39	-0,59	Yhdistelmä
d _{gM} , vallittu	61,8	46,6	0,51	-0,13	Berkson
h _{gM} , vallittu	33,4	26,2	0,49	-0,17	Berkson
Ikä, vallittu	581,0	604,1	0,32	-0,37	Yhdistelmä

Taulukko 11. Taimikkoaineiston puustotunnusten keskiarvot suunnittelijalla ja tarkistusmittauksessa. Käytetyt merkinnät: n = lukumäärä, RL = runkoluku, d = aritmeettinen keskiläpimitta, h = aritmeettinen keskipituus, Ikä = aritmeettinen keski-ikä.

	T1		T2	
	Tarkistusinventointi	Suunnittelija	Tarkistusinventointi	Suunnittelija
n	91	91	151	151
RL (m ³ /ha)	5160,0	4185,6	3661,8	3202,5
d (cm)	0,3	0,2	3,2	3,5
h (m)	0,7	0,6	3,1	3,2
Ikä (a)	4,5	4,6	13,4	14,1

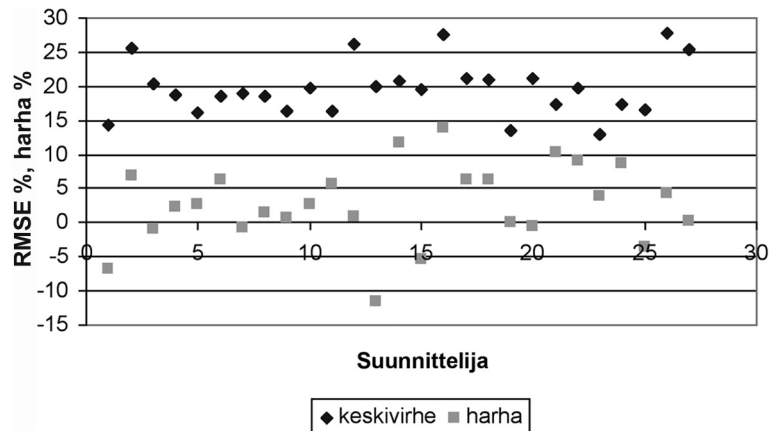
pinta-alan sisäisen hajonnan välinen korrelaatio oli hieman suurempi (-0,14).

Kuvioittaisen arvioinnin puustotunnuksista Berksonin tapauksia olivat kuvion puuston kokonaispohjapinta-ala ja keskipituus, vallitsevan puulajin keskiläpimitta sekä sivupuulajin keskiläpimitta ja pituus (taulukko 10). Näissä tapauksissa mittaajilla on ollut tietynlainen pyrkimys arvioida tunnuksat keskimääräisinä metsikön tyyppin mukaan. Keskiläpimitan ja -pituuden arviointiin liittyy silmävaraista arviointia sekä itse mittauksista että koalojen sijoittelusta. Kuvion pohjapinta-alan arviointiin sisältyy subjektiivinen koalojen sijoittelu.

Puustotunnuksista ns. tavallisia tapauksia oli vain kuvion ikä (taulukko 10). Iän arviointivirheet korreloivat voimakkaammin arvioitujen arvojen kuin tosiarvojen kanssa ja arvioitujen arvojen varianssi

oli suurempi kuin tosiarvojen. Iän arvio perustuu joko tietoon metsikön perustamisvuodesta, kairauksiin tai vuosikasvainten laskemiseen. Metsikön ikä ei vaihtelee metsikön sisällä niin voimakkaasti kuin muut puustotunnukset, joten koalojen otantavirhe vaikuttaa ikäarvioon vähemmän kuin useimpiin muihin tunnuksiin.

Loput tarkastelluista puustotunnuksista (puuston keskiläpimitta, pääpuulajin ja sivupuulajin pohjapinta-ala sekä ikä ja pääpuulajin keskiläpimitta) olivat Berksonin tapauksen ja tavallisen tapauksen yhdistelmiä. Näillä tunnuksilla tosiarvojen ja arvioitujen arvojen varianssit olivat samalla tasolla. Lisäksi arviointivirheet korreloivat sekä tosiarvojen että arvioitujen arvojen kanssa: korrelaatio tosiarvojen ja arviointivirheiden välillä oli positiivista ja arvioitujen arvojen ja arviointivirheiden välillä negatiivista.



Kuva 3. Kuvion pohjapinta-alan keskivirheen ja harhan vaihtelu suunnittelijoiden kesken.

Näiden tunnusten arviointiin liittyy sekä mittauksia että oman harkinnan käyttöä.

Taimikkoaineistossa suunnittelija arvioi runkoluvun jonkin verran pienemmäksi kuin tarkistusmittauksessa (taulukko 11). Kehitysluokassa T1 aliarvio oli 974,4 runkoa/ha (23,3 %) ja keskivirhe 2 617,3 runkoa/ha (62,5 %). Kehitysluokassa T2 aliarvio oli 459,4 runkoa/ha (14,3 %) ja keskivirhe 1 513,1 runkoa/ha (47,2 %). Taimikon ikä yliarvioitiin hieman: kehitysluokassa T1 0,1 vuotta ja kehitysluokassa T2 0,7 vuotta.

3.2 Mittaajien välinen vaihtelu

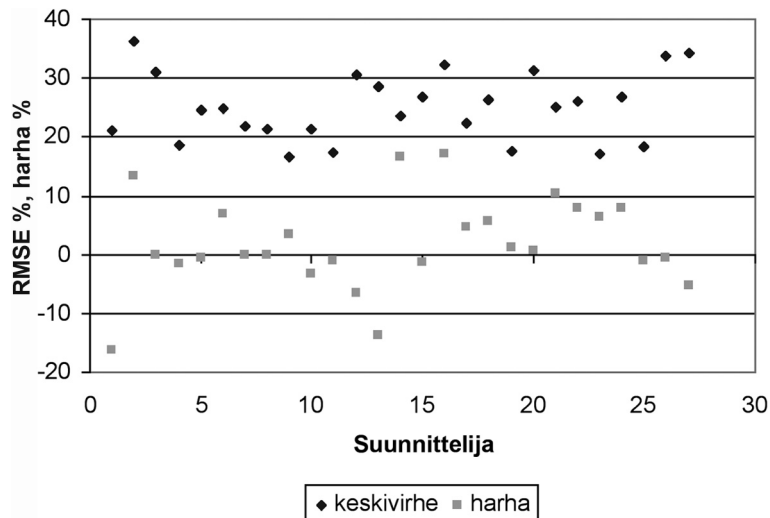
Mittaajakohtaisissa graafisissa tarkasteluissa on mukana ne 27 mittaajaa, joilta oli vähintään 20 tarkistuskuviota. Mittaajien välinen vaihtelu oli suurta tutkimusaineistossa. Pohjapinta-alan keskivirhe vaihteli mittaajien välillä 13,0 %:sta 27,7 %:iin (kuva 3). Kun tarkistusmittauksen mittaajakohtaiset otantavirheet vähennettiin em. keskivirheistä, vaihteli mittaajakohtainen keskivirhe 6,6 %:sta 24,5 %:iin. Valtaosa mittaajista aliarvioi kuvion pohjapinta-alan. Mitä suurempi pohjapinta-alan keskivirhe mittaajalla oli, sitä varmemmin pohjapinta-alasta oli suuri aliarvio. Pohjapinta-alan keskivirheen ja harhan välinen korrelaatio oli 0,26.

Myös keskitilavuuden keskivirhe vaihteli mittaajien välillä melkoisesti 16,5 %:sta 36,2 %:iin (ku-

va 4). Kun tarkistusmittausten mittaajakohtaiset otantavirheet vähennettiin em. keskivirheistä, vaihteluväli oli 10,6 %:sta 33,9 %:iin Keskitilavuuden harha vaihteli -16,2 %:sta 17,0 %:iin. Mittaajakohtaiset estimoidut keskitilavuudet olivat huomattavia aliarvioita selvästi useammin kuin huomattavia yliarvioita. Myös keskitilavuuden osalta suunnittelijat, joilla oli suuri tilavuuden keskivirhe, yleensä aliarvioivat tilavuuden, korrelaation ollessa keskivirheen ja harhan välillä 0,13.

Mittaajakohtainen keskiläpimitan keskivirhe oli pienimmillään 6,2 % ja suurimmillaan 23,3 %. Tarkistusmittausten mittaajakohtaiset otantavirheet vähennettynä keskiläpimitan keskivirheen vaihteluväliksi tuli 2,6–21,4 %. Mittaajakohtaisesti keskiläpimitan harha vaihteli -4,8 %:sta 11,2 %:iin. Mittaajakohtainen keskipituuden keskivirhe vaihteli 11,5 %:sta 19,7 %:iin ja harha -7,5 %:sta 8,4 %:iin. Tarkistusmittausten mittaajakohtaiset otantavirheet vähennettynä keskipituuden keskivirheen vaihteluväliksi tuli 10,9–19,2 %.

Mittaajien välistä vaihtelua tarkasteltiin myös varianssikomponenttimalleilla mittausvirheiden neliölle ja mittausvirheille 1. mittausten harhalle. Taulukossa 12 on esitelty tarkastelluista malleista edustavimmat. Mittaajien välinen vaihtelu tuli hyvin esille puustotunnusten harhalle laadituissa varianssikomponenttimalleissa (taulukko 12). Esimerkiksi pohjapinta-alan harhalle laaditussa mallissa mittaajien välinen vaihtelu oli 8,1 % jäännösvirheiden



Kuva 4. Kuvion keskitilavuuden keskivirheen ja harhan vaihtelu suunnittelijoiden kesken.

kokonaisvaihtelusta. Varttuneiden kasvatusmetsien vastaavassa mallissa mittaajien välinen vaihtelu oli 20,3 % jäännösvirheiden kokonaisvaihtelusta. Puustotunnusten mittausrvirheiden neliölle laadituissa malleissa mittaajan vaikutus löytyi selvimmän keskikäpimitan virheen neliön tapauksessa, missä mittaajan vaikutus oli 4,2 % jäännösvirheiden kokonaisvarianssista. Neliömallien kiinteän osan selityssasteet olivat melko huonot: esimerkiksi taulukossa esitetyn keskikäpimitan neliömallin kiinteän osan selityssaste jäi 0,03:een selittäjien ja vakion ollessa kuitenkin tilastollisesti merkitseviä.

3.3 Käytetyn läpimittajakaumamallin vaikutus inventointitulosten laskennassa

Tutkimuksessa vertailtiin myös, mitä vaikutusta eri läpimittajakaumamallien käytöllä on inventointitulosten laskennassa. Käytettäessä virheettömiä puuston keskitunnuksia inventointitulosten laskennassa keskitilavuuden keskivirheeksi tuli Weibull-jakamalla 2,46 % ja runkoluvulla kalibroituina keskivirhe laski 2,08 %:iin. Runkoluvuttomilla prosenttiosuusmalleilla keskitilavuuden keskivirheeksi tuli 2,72 % ja runkoluvullisilla prosenttiosuusmalleilla keskitilavuuden virhe oli pienimmillään 1,88 %. Runkolu-

vuttomilla Johnsonin S_B -jakaumamalleilla keskitilavuuden keskivirheeksi saatiin 2,37 % ja runkoluvullisilla keskivirhe oli 2,29 %.

Laskettaessa kuvioittaisen arvioinnin aineiston inventointitulokset eri jakaumamalleilla keskitilavuuden ja tukkitilavuuden keskivirheet vaihtelivat melko vähän eri laskentamallien välillä (taulukko 13). Keskitilavuuden ja tukkitilavuuden keskivirheet olivat pienimmillään runkoluvulla kalibroidulla Weibull-jakaumalla ja runkoluvullisilla prosenttiosuusmalleilla. Kummassakin tapauksessa käytetty runkoluku johdettiin puusto-ositteen keskipuusta. Toisaalta runkoluvun virheet olivat tällöin melko suuret ja runkoluvut aliarvioitiin selvästi toisin kuin tukkitilavuus, joka yliarvioitiin.

3.4 Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus vertailuaineistoissa

Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta tutkittiin myös neljässä erillisessä tarkistusmittausaineistossa. Näissä vertailuaineistoissa keskitilavuuden keskivirhe oli pienimmillään 17,3 % ja suurimmillaan 36,5 % (taulukko 14). Merkittävää oli, että keskitilavuudeltaan pienimmässä aineistossa oli myös suurimmat absoluuttiset virheet ja samalla harhat. Ainoastaan

Taulukko 12. Varianssikomponenttimallit erälle puustotunnusten arvioimisvirheille ja harhoille. Taulukossa puulajien lkm on niiden puulajien lukumäärä, joiden osuus metsikön pohjapinta-alasta on vähintään 10 %, m_{ik} on mittaajaa i kuvaava satunnainen tekijä puustotunnuksella k , e_{ik} on mallin jäännösvirhe ja m_{jv} on mittaajien välisen vaihtelun osuus mallin jäännösvaihtelusta.

Selitettävä muuttuja		Estimaatti	95 %:n luottamusväli	Osuus (%)
ln(d_{gM} :n virhe ²)	Vakio	-1,15614	(-1,68801, -0,62427)	
	d_{gM}	0,05011	(0,02748, 0,07274)	
	Puulajien lkm	0,19489	(0,01397, 0,37582)	
	m_{ik}	0,43562	(0,28482, 0,66625)	
	e_{ik}	2,08879	(1,99965, 2,18190)	
	m_{jv}			4,2
PPA:n harha	Vakio	-6,09591	(-6,96294, -5,22887)	
	PPA	0,35243	(0,31440, 0,39047)	
	d_{gM}	-0,04186	(-0,08251, -0,00121)	
	Puulajien lkm	0,34578	(0,07140, 0,62017)	
	Kehitysluokka 3	-0,84873	(-1,23724, -0,46022)	
	m_{ik}	0,91536	(0,67753, 1,23667)	
	e_{ik}	3,09013	(2,95793, 3,22825)	
	m_{jv}			8,1
PPA:n harha kl 03	Vakio	-8,26598	(-9,68261, -6,84935)	
	PPA	0,40290	(0,33969, 0,46611)	
	m_{ik}	1,49350	(1,09666, 2,03394)	
	e_{ik}	2,95565	(2,74508, 3,18237)	
	m_{jv}			20,3
Keskitilavuuden harha	Vakio	-63,62484	(-73,83010, -53,41958)	
	V	0,526244	(0,46202, 0,59047)	
	PPA	-1,95372	(-2,60381, -1,30362)	
	Puulajien lkm	2,91302	(0,30503, 5,52101)	
	Kehitysluokka 1	40,77369	(33,82475, 47,72263)	
	Kehitysluokka 2	13,58366	(8,18052, 18,98680)	
	m_{ik}	8,82409	(6,46336, 12,04707)	
	e_{ik}	29,30015	(28,04652, 30,60981)	
	m_{jv}			8,3

Kontiolahden aineistossa keskitilavuus yliarvioitiin. Pääosa Kontiolahden aineiston 29:stä kuvioista oli joko männiköitä (14) tai koivikoita (4). Puustotunnusten keskivirheiden ja harhojen vaihtelu vertailuaineistoissa vastaa varsinaisessa tutkimusaineistossa havaittua mittaajakohtaista vaihtelua (taulukko 15). Kontiolahden aineistossa saatu keskitilavuuden yliarvio hakkuukypsille kuusikoille selittyi keskipituuden yliarviolla ja aineistonmuodostuksen virheellä.

4 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa selvitetiin nykyisin käytössä olevan SOLMU-muotoisen kuvioittaisen arvioinnin tark-

kuutta laajalla tarkistusmittausaineistolla. Kuvion keskitilavuuden keskivirheeksi tuli 24,8 % ja tarkistusmittauksen otanta- ja mittausrvirhe huomioon otettuna keskivirhe laski 21,4 %:iin. Puustotunnusten keskivirheet vastasivat aika pitkälle aikaisemmista laajoista kuvioaineistoista tehtyjä tutkimuksia (mm. Poso 1983, Laasasenaho ja Päivinen 1986). Kun puustotunnusten luotettavuutta tarkasteltiin mittaajakohtaisesti, epävarmimpien mittaajien luotettavuus oli samalla tasolla kuin viimeaikaisissa korvaavien menetelmien tutkimuksissa saadut suu-rehket virhetasot yhtenäisillä, yhden suunnittelijan mittaamilla alueilla (Pussinen 1992, Hyypä ym. 1999, Anttila 2002a, Hyvönen 2002). Kuvioittaisen arvioinnin tutkimuksissa tarkistusmittaus on useimmiten suoritettu systemaattisella relaskoopiotan-

Taulukko 13. Eri läpimittajakaumamalleilla ja tavoin ennustettujen kuvion puustotunnusten suhteelliset keskivirheet ja harhat. Vertailtujen mallivaihtoehtojen lyhenneet: Weib = Weibull-jakauma; PROS, ei rl = runkoluvuton prosenttiosuusmalli; SB, ei rl = runkoluvuton Johnsonin S_B -jakauma; Weib, kalib = keskipuun runkoluvulla kalibroitu Weibull-jakauma; PROS, rl = runkoluvullinen prosenttiosuusmalli, keskipuun runkoluku; SB, rl = runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma, keskipuun runkoluku; Weib, malli = estimoidulla runkoluvulla kalibroitu Weibull-jakauma; PROS, malli = runkoluvullinen prosenttiosuusmalli, estimoitu runkoluku; SB, malli = runkoluvullinen Johnsonin S_B -jakauma, estimoitu runkoluku.

Jakaumamalli	Keskivilavuus	Tukkitilavuus	Runkoluku
Keskivirhe, %			
Weib	24,8	44,5	55,6
PROS, ei rl	25,8	49,3	57,0
SB, ei rl	25,6	46,1	55,5
Weib, kalib	24,5	41,9	62,5
PROS, rl	24,5	42,7	58,1
SB, rl	25,1	45,8	55,7
Weib, malli	25,6	57,8	46,8
PROS, malli	25,1	45,8	41,5
SB, malli	25,4	46,9	48,6
Harha, %			
Weib	1,6	2,3	1,5
PROS, ei rl	3,4	8,1	-18,9
SB, ei rl	3,1	4,8	-13,0
Weib, kalib	-0,3	-7,1	17,2
PROS, rl	0,3	-4,0	9,0
SB, rl	1,9	4,0	2,3
Weib, malli	2,8	12,0	-2,8
PROS, malli	1,8	3,8	-7,1
SB, malli	2,4	6,0	-13,0

nalla (Poso 1983, Mähönen 1984, Laasasenaho ja Päivinen 1986, Pigg 1994). Kuitenkaan kaikissa tutkimuksissa ei ole huomioitu tarkistusmittauksen otantavirhettä. Tutkimuksessa ei kiinnitetty huomiota kuvion rajauksessa tapahtuneisiin virheisiin vaan ne sisällytettiin arviovirheeseen.

Absoluuttiset puustotunnusten virheet olivat suurimmillaan kuusikoissa. Myös Laasasenahon ja Päivisen (1986) tutkimuksessa kuusikot arvioitiin mänköitä huonommin. Kuusimetsissä pohjapinta-ala aliarvioitiin selvästi, joka johtui suurelta osin siitä, että aineiston kuusikoissa oli paljon tiheitä ja runsaspuustoisia kuvioita, joissa puustotunnukset pääsääntöisesti aliarvioitiin. Kuviotunnusten suhteelliset virheet olivat suurimmillaan sekametsissä. Sekametsistä suuri osa oli nuoria metsiköitä, joissa arvioimisvirheet olivat muutenkin suurimpia. Toisaalta sekametsien ongelmana on puulajisuusien määrittäminen, mikä voi vaikeuttaa puulajikertymien ja kasvun määritystä. Kun aineisto jaettiin metsätyyppiin mukaan ositteisiin, arvioidut kuviotunnukset olivat sitä luotettavampia mitä karumpi kasvupaikka oli.

Suunnittelijoiden välinen vaihtelu oli suurta. Jonkin verran vaihtelua selittää aineistojen poikkeavuudet suunnittelijoiden välillä, vaikka tarkistusmittauksessa kerättiin samalta suunnittelijalta tarkistuskuvioita kaikista kehitysluokista. Esimerkiksi pohjapinta-alan keskiarvon vaihteluväli suunnittelijoiden kesken oli 15,1–23,5 m²/ha ja keskiläpimitan keskiarvon vaihteluväli 16,4–20,8 cm. Suhteellinen virhe pyrki olemaan sitä pienempi, mitä suurempi puustotunnuksen keskiarvo suunnittelijalla oli. Tosin löytyi niitä suunnittelijoita, joilla oli pienet keskivirheet ja keskiarvot ja päinvastoin. Suunnitte-

Taulukko 14. Vertailuaineistojen puustotunnusten keskivirheet (RMSE) ja harhat. Suluissa suhteelliset keskivirheet ja harhat.

		Suonenjoki	Leppävirta	Mikkeli	Kontiolahti
Keskivirhe	d_{gM} (cm)	5,5 (28,2)	3,1 (14,1)	2,9 (13,2)	2,1 (14,0)
	h_{gM} (m)	2,3 (12,3)	2,6 (14,5)	2,0 (11,1)	2,1 (11,3)
	PPA (m ² /ha)	5,2 (29,9)	4,3 (20,2)	3,8 (15,6)	4,0 (15,7)
	V (m ³ /ha)	58,1 (36,5)	48,2 (26,7)	37,5 (17,5)	38,1 (17,3)
Harha	d_{gM} (cm)	4,6 (23,4)	0,3 (1,3)	1,3 (6,0)	1,1 (5,0)
	h_{gM} (m)	1,5 (8,2)	0,6 (3,3)	0,8 (4,6)	-1,0 (-5,4)
	PPA (m ² /ha)	3,1 (17,6)	1,8 (8,3)	0,4 (1,5)	0,8 (3,0)
	V (m ³ /ha)	37,9 (23,8)	26,6 (14,8)	6,5 (3,0)	-1,1 (-0,5)

Taulukko 15. Vertailuaineistoista (vert) ja laajasta tarkistusmittausaineistosta (tark) valittujen kuvio-ositteiden puustotunnusten keskvirheet (RMSE) ja harhat. Suluissa suhteelliset keskvirheet ja harhat.

	Kl	pääpuulaji	n	V(vert)	V(tark)	PPA(vert)	PPA(tark)	dgm(vert)	dgm(tark)
Keskivirhe									
Suonenjoki	02	mänty	10	44,2 (43,4)	24,0 (26,2)	5,9 (38,9)	3,2 (19,6)	3,5 (28,7)	1,9 (14,9)
Suonenjoki	03	kuusi	7	61,4 (28,8)	46,1 (23,5)	5,1 (24,3)	4,5 (19,1)	7,0 (31,6)	2,7 (15,5)
Leppävirta	03	kuusi	5	60,1 (28,5)	46,1 (23,5)	4,6 (19,9)	4,5 (19,1)	2,7 (11,3)	2,7 (15,5)
Mikkeli	04	sekametsä	6	62,0 (24,3)	52,8 (23,9)	2,4 (8,9)	5,3 (23,1)	8,2 (34,1)	2,5 (9,6)
Kontiolahti	04	kuusi	6	45,3 (18,4)	58,0 (24,3)	4,2 (16,7)	4,7 (19,6)	2,2 (8,2)	2,8 (13,3)
Kontiolahti	04	sekametsä	9	40,1 (15,9)	52,8 (23,9)	4,9 (18,2)	5,3 (23,1)	2,1 (8,6)	2,5 (9,6)
Harha									
Suonenjoki	02	mänty	10	11,5 (11,3)	-2,8 (-3,0)	1,4 (9,3)	-0,4 (-2,4)	3,2 (25,8)	0,2 (2,0)
Suonenjoki	03	kuusi	7	47,9 (22,5)	3,8 (1,9)	3,5 (16,5)	1,0 (4,3)	6,7 (30,2)	0,2 (0,8)
Leppävirta	03	kuusi	5	57,0 (27,0)	3,8 (1,9)	4,4 (19,0)	1,0 (4,3)	1,1 (4,5)	0,2 (0,8)
Mikkeli	04	sekametsä	6	26,6 (10,4)	23,1 (10,5)	-0,02 (-0,1)	3,4 (14,9)	4,3 (18,1)	-0,3 (-1,1)
Kontiolahti	04	kuusi	6	-2,2 (-0,9)	29,8 (12,5)	1,2 (4,5)	2,8 (11,7)	0,2 (0,7)	0,7 (2,7)
Kontiolahti	04	sekametsä	9	-1,7 (-0,7)	23,1 (10,5)	2,1 (7,8)	3,4 (14,9)	0,5 (1,9)	-0,3 (-1,1)

lijoiden välinen vaihtelu oli merkitsevää erityisesti puustotunnusten systemaattisten virheiden osalta. Myös Pitkäsen (1992) ja Kankaan ym. (2002) tutkimuksissa havaittiin mittaajien välisen vaihtelun olevan merkitsevää.

Tutkimusaineiston kuviot sijaitsivat metsäyhtiön mailla. Yksityismetsissä kuvioiden sisäinen vaihtelu voi olla jonkin verran suurempaa (Maltamo ym. 1997, Uuttera ym. 1998). Toisaalta Laasasenahon ja Päivisen (1986) tutkimuksessa vertailtiin yhtiöiden omistamien ja Poson (1983) tutkimuksessa käsiteltyjen yksityismetsien kuvioiden sisäistä hajontaa, ja tutkimuksessa ei löydetty suuria eroja omistajaryhmien väliltä. Vaikka tutkimuksen aineisto olikin metsäyhtiön hallitsemista metsistä, arvioijista suurin osa oli kuitenkin yksityismetsien suunnitteluorganisaatioista.

Mittaajat saivat koulutusta ja palautetta mittauksistaan koko tarkistusmittausajan. Luultavasti tämä ainakin osittain pani mittaajat kiinnittämään huomiota omaan työskentelyynsä ja etsimään parannettavaa. Tarkistusmittauksen ajaksi olisi kannattanut perustaa vertailuryhmä, jolle koulutusta ja palautetta ei olisi annettu. Näin olisi saatu tietoa koulutuksen vaikutuksesta arvioinnin luotettavuuteen.

Pohjapinta-alan aliarvio suuremmilla pohjapinta-aloilla on tunnettu ilmiö. Tämänkin tutkimuksen aineistossa suunnittelija oli arvioinut liian pienen poh-

japinta-alan 69 kuvioille 74:stä kuvioilla, joilla pohjapinta-ala oli yli 30 m²/ha. Keskitilavuudesta saatiin selvä aliarvio runsaspuustoilla kuvioilla, kun pohjapinta-alan aliarvioon lisättiin vielä runsaspuustoisten kuvioiden pohjapinta-alamediaanipuun läpimitan ja pituden systemaattiset aliarviot. Vähäpuustoilla kuvioilla tehtiin pienehkö yliarvio pohjapinta-alasta ja usein keskipituudesta ja -läpimitasta.

Runsaspuustoilla kuvioilla puustotunnusten aliarviot voivat johtua monestakin eri syystä. Suunnittelijat voivat olla ylivarovaisia puustotunnusten suhteen: suunnittelija voi pyrkiä tietoisesti alentamaan arvioimiaan puustotunnusten arvoja, koska pitää metsänomistajan suhtautumista mahdollisiin aliarvioihin positiivisempänä kuin yliarvioihin. Toisaalta runsaspuustoisten metsiköiden pohjapinta-ala on hankala mitata etenkin suunnittelijoiden käyttämällä relaskooppikertoimella 1. Suurin osa arvioiduista puustotunnuksista osoittautui lisäksi joko Berksonin tapaukseksi tai sen ja tavallisen tapauksen yhdistelmäksi. Berksonin tapauksessa suunnittelijat ovat arvioineet tunnuksen käyttäen kyseisen tyyppin metsikön keskimääräistä tunnuksen arvoa jonkinlaisena mittariarvona (Kangas ym. 2002). Pohjapinta-alan arviointiin liittyy pitkälti silmävaraista arviointia koealojen sijoittelussa ja puulajisuuksien määrittämisessä, mikäli ei käytetä suoraan koealoilta laskettuja keskiarvoja.

Kun tämän tutkimuksen tuloksia vertaillaan muihin tutkimuksiin, on muistettava, että eri tutkimuksissa on selviä eroja keskenään esimerkiksi aineiston kattavuudessa, pituusvaihtelun huomioinnissa, käytetyissä laskentamenetelmissä ja luotettavuustunnusten laskentatavassa. Pituuden todellisen vaihtelun huomiointi kuviolla voi olla yksi virhelähde (esim. Kangas ym. 2002, Maltamo ym. 2002b). Tässä tutkimuksessa kokeiltiin, mitä vaikutusta pituuden vaihtelun paremmalla huomioimisella voi olla puustotunnusten arviointivirheisiin. Tarkistusmittausaineiston lukupuille estimoituihin pituuksiin lisättiin satunnaista hajontaa pituusmallien jäännöshajontaa vastaavasti. Pituusvaihtelun huomioiminen edellä esitetyllä tavalla kasvatti mittaajien keskipituusarvion keskivirheen 15,7 %:sta 18,5 %:iin. Keskitilavuuden virhe pysyi käytännöllisesti katsoen samana; se kasvoi vain 0,5 %-yksikköä. Aineistonmuodostuksesta aiheutuva virhe keskitilavuuteen kasvoi 2,5 %:sta 6,6 %:iin, kun aineistonmuodostus perustui virheetömiin tarkistusmittauksista laskettuihin keski- ja summatunnuksiin. Keskipituuden virhe kasvoi vastaavasti 10,2 %:sta 14,2 %:iin. Kun aineistonmuodostus perustui suunnittelijan arviotvirhettä sisältävään kuvioittaisen arvioinnin keski- ja summatunnuksiin, pituuden vaihtelun lisääminen laskentaketjuun ei lisännyt tilavuusennusteiden virhettä.

Tutkimuksessa kuvioiden sisäinen hajonta kasvoi vain osittain kuvion koon kasvaessa. Ehkä osittain vaikutuksen puuttumista selittää tutkimusaineiston sijoittuminen metsäyhtiöiden metsiin. Tällöin kuvioiden käsittelytavat ovat melko tavalla samat riippumatta kuvioiden koosta ja vaihtelu on paljon vähäisempää. Poson (1983) tutkimuksessa kuvioiden sisäinen hajonta kasvoi kuvion pinta-alan kasvaessa, mutta Ojansuun ym. (2002) tutkimuksessa kuvioiden sisäinen hajonta ensiharvennusvaiheen männiköissä ei riippunut kuvion koosta tarkastelluilla puustotunnuksilla. Kaukokartoitusmenetelmien tulkinnessa havaittu vaikutus puustotunnusten helpommasta arvioinnista isommille kuvioille (mm. Anttila 2002a) johtuu pitkälti reunavaikutuksien vähentymisestä kuvion koon kasvamisen vuoksi.

Tutkimuksessa vertailtiin myös erilaisten läpimittajakaumamallien käyttöä inventointitulosten laskennassa käytettävien kuvauspuiden tuottamisessa. MELA-järjestelmässä perinteisesti käytössä olevat Weibull-jakaumamallit toimivat hyvin verrat-

tuina muihin mallivaihtoehtoihin. On kuitenkin huomioitava, että arvioitu runkoluku ei ollut käytössä, vaan käytettiin puustotunnusten avulla ennustettua runkolukua. Oikean runkoluvun käyttöä virheellisen aineiston yhteydessä kokeiltiin myös, mutta tällöin keskitilavuuden ennustevirhe oli selvästi huonompi kuin ilman runkolukuakin saatu ennustevirhe. Tällainen teoreettinen yhdistelmä, oikea runkoluku ja virheelliset mittaustiedot, tuottaa usein toisiinsa nähden epäloogiset puustotunnukset, jolloin runkoluvulliset jakaumamallit eikä myöskään runkoluvulla kalibrointi toimi hyvin. Näyttää siltä, että pieniltä relaskooppi-koaloilta laaditut Weibull-jakaumamallit toimivat vähintään yhtä hyvin kuin myöhemmin laaditut jakaumamallit. Laskennallisen runkoluvun virhe oli kuitenkin selvästi pienempi kuin esim. Kankaan ym. (2002) tutkimuksessa, missä runkoluku oli tosin arvioitu koelalta. Käytettäessä virheetömiä puuston keskitunnuksia inventointitulosten laskennassa saatiin samansuuntaisia tuloksia jakaumamallien välille kuin mm. Maltamo ym. (2002a, b). Läpimittajakaumamallit on laadittu koko metsikön läpimittajakaumalle. Tarkistusmittausaineistossa rajoitettiin kuitenkin puiden läpimittajakaumaa, koska oletuksena oli, ettei suunnittelija huomioi varttuneemmissa metsissä merkityksettömiä pieniä puita. Tuotettuja jakaumia voidaan kalibroida esimerkiksi viiden sentin minimiläpimitalla. Onhan inventoinnin tarkoituksena useimmiten selvittää käyttöpuun ja metsikön kehitykseen vaikuttavan puuston osuus metsikössä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin inventoinnin luotettavuutta tarkastusinventoinnilla, jolloin mukaan tulevat myös tilavuuden laskentaan käytettyjen mallien virheet. Tarkistusinventoinnin sijasta puustotunnusten arvioita voitaisiin verrata myös todelliseen hakkuukertymään. Tällöin on kuitenkin huomioitava maastoon jäävän hukkapuun osuus, minkä vaihtelu voi olla suurta leimikoiden kesken. Lisäksi puutaralajiosuoksien virheen määrittämisessä tulisi ottaa huomioon leimikoiden vaihtelevat puulajiosuoksien apteeraukset. Todellisen hakkuukertymän käyttö tarkistusmittauksissa rajoittuisi pelkästään hakkuukypsiin metsiin.

Kuvioittaisen arvioinnin ongelmana on sen tarkkuuden määrittämisen vaikeus. Jos kuvioittaisessa arvioinnissa käytettäisiin systemaattista koelaverkkoa (Koivuniemi 2003), voitaisiin puustotunnusten tarkkuutta arvioida jo maastossa, ja säättää mitattava

koealamäärä vastaamaan tavoitetarkkuutta. Menetelmällä saadut hyödyt voivat kompensoida menetelmän aiheuttamat lisäkustannukset alueilla, joissa metsien käsittely on pienipiirteistä, ja luonnon monimuotoisuus sekä metsien virkistyskäyttö on otettava huomioon. Paikannettu systemaattinen koealaverkko mahdollistaa myös esimerkiksi pienempien toimenpidekuvioiden rajaamisen isohkoista inventoiduista kuvioista tai kuvioiden yhdistämisen. Puustotiedot muodostetuille uusille kuvioille saadaan paikannetuilta koealoilta. Toisaalta perinteisessä kuvioittaisessa arvioinnissakin on jo kokeiltu koealojen paikannusta.

Kehittyneet tai vaihtoehtoiset mittaustekniikat, kuten kaukokartoitusmenetelmät tai digitaalinen pituden mittaus Vertex-hypsometrillä, voivat muuttaa kuvioittaisen arvioinnin tarkkuutta. Myös uusia malleja ja menetelmiä kehitetään jatkuvasti tila-uuksien ja kertymien laskentaan kuvioaineistosta. Myös uusia mittaussyhdistelmiä voidaan ottaa käyttöön, tosin nykysuuntauksena on pyrkimys keventää maastotyötä. Uudistukset voivat muuttaa kuvioittaisen arvioinnin tarkkuutta metsävaratietojen hankintamenetelmänä.

Kiitokset

Tekijät haluavat lämpimästi kiittää professori Annika Kangasta, professori Matti Maltamo ja MMT Lauri Mehtätaloa sekä käsikirjoituksen kahta esitarkastajaa lukuisista hyödyllisistä kommentista ja muutosehdotuksista käsikirjoituksen eri vaiheissa. Lämpimät kiitokset myös mmyy Sami Vesteriselle, Pohjois-Karjalan metsäkeskukselle ja Tornator Oy:lle tutkimusaineiston toimittamisesta. Tutkimuksen päärahoittajana toimivat Suomen Akatemia ja Joensuun yliopiston Metsätieteellinen tiedekunta.

Kirjallisuus

- A language and environment for statistical computing. 2004. Reference Index. Version 2.0.1. (2004-11-5). R Development Core Team.
- Anttila, P. 2002a. Nonparametric estimation of stand volume using spectral and spatial features of aerial photographs and old inventory data. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1849–1857.
- 2002b. Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36(2): 549–560.
- Carroll, R.J., Ruppert, D. & Stefanski, L.A. 1995. Measurement error in nonlinear models. *Monographs on Statistics and Applied Probability* 63. 305 s.
- Hyvönen, P. 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpideehdotusten estimointi *k*-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM -satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 363–379.
- & Korhonen, K.T. 2003. Metsävaratiedon jatkuva ajantasaistus yksityismetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2003: 83–96.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y-H. 1999. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128: 109–120.
- Kangas, A. & Maltamo, M. 2000. Performance of percentile based diameter distribution prediction and Weibull method in independent data sets. *Silva Fennica* 34(4): 381–398.
- , Heikkinen, E. & Maltamo, M. 2002. Puustotunnusten maastoarvioinnin luotettavuus ja ajanmenekki. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 425–440.
- Kilkki, P., Maltamo, M., Mykkänen, R. & Päivinen, R. 1989. Use of the Weibull function in estimating the basal area diameter distribution. *Silva Fennica* 23: 311–318.
- Koivuniemi, J. 2003. Metsiköihin ja paikannettuihin koealoihin perustuvan kuvioittaisen arvioinnin tarkkuus. The accuracy of the compartmentwise forest inventory based on stands and located sample plots. *Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja* 36. 160 s.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Maltamo, M., Uuttera, J. & Kuusela, K. 1997. Differences in forest stand structure between forest ownership groups in Central Finland. *Journal of Environmental Management* 51: 145–167.
- , Haara, A., Hirvelä, H., Kangas, A., Lempinen, R., Malinen, J., Nalli, A., Nuutinen, T. & Siipilehto, J.

- 2002a. MELA2002 ja kuvauspuiden muodostamisen vaihtoehdot. Julkaisussa: Nuutinen, T. & Kiiskinen, A. (toim.). MELA2002 ja käyttöpuun kuvaus. MELA-käyttäjöpäivä 7.5.2002 Joensuu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 865: 11–31.
- , Haara, A., Hirvelä, H., Kangas, A., Lempinen, R., Malinen, J., Nalli, A., Nuutinen, T. & Siipilehto, J. 2002b. Lämpimittajakaumamalleihin perustuvat vaihtoehdot kuvauspuiden muodostamiseen puuston keskitunnustietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 407–423.
- , Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stand density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90(3): 319–330.
- Mehtätalo, L. 2002. Valtakunnalliset puukohtaiset tukki-vähennysmallit männyille, kuuselle, koivuille ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575–591.
- Mykkänen, R. 1986. Weibull-funktion käyttö puuston lämpimittajakauman estimoinnissa. *Metsätalouden syventävien opintojen tutkielma*. Joensuun yliopisto. 80 s.
- Mähönen, M. 1984. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsänarvioimistieteen tutkielma maatalous- ja metsätieteiden kandidaatin tutkintoa varten*. Helsingin yliopisto. 55 s.
- Nersten, S. & Næset, E. 1992. Accuracy of standwise relascope survey. *Meddelelser fra communications of Skogsforsk* 45(8): 1–22.
- Ojansuu, R., Halinen, M. & Härkönen, K. 2002. Metsätalouden suunnittelujärjestelmän virhelähteet männyn esiharvennuskypsyden määrittämisessä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 441–457.
- Pigg, J. 1994. Keskilämpimittajan ja puutavaralajijakauman sekä muiden puustotunnusten tarkkuus Metsähallituksen kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -työ*. Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos. 92 s.
- Pitkänen, J. 1992. Silmävaraisen kuvioittaisen arvioinnin virhekomponentit puuston tilavuuden määrittämisessä. *Pro gradu -työ*. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 45 s. + liitteet.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17: 313–343.
- 1994. Metsätalouden suunnittelu uusiin puihin. Voidaanko silmävaraisesta kuvioittaisesta arvioinnista luopua? *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1994(1): 85–89.
- Pukkala, T. 1990. The method for incorporating the within-stand variation into forest management planning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5: 263–275.
- Purola, M. 1983. Silmävaraisen arvioinnin tarkkuus metsätaitokilpailussa. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -työ*. Helsingin yliopisto. 89 s.
- Pussinen, A. 1992. Ilmakuvat ja Landsat TM -satelliittikuva välialueiden kuvioittaisessa arvioinnissa. *Pro gradu -työ*. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 48 s.
- Redsven, V., Anola-Pukkila, A., Haara, A., Hirvelä, H., Härkönen, K., Kettunen, L., Kiiskinen, A., Kärkkäinen, L., Lempinen, R., Muinonen, E., Nuutinen, T., Salminen, O. & Siitonen, M. 2002. MELA2002 reference manual. [Verkkodokumentti]. The Finnish Forest Research Institute, Helsinki. 588 s. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/mela/tuotteet/mela2002.pdf>
- Siipilehto, J. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. *Silva Fennica* 34: 331–349.
- SOLMU. Maastotyöopas. 1996. Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio, Helsinki. 80 s.
- SOLMU. Maastotyöopas. 2003. Metsätalouden kehittämisskeskus Tapio, Helsinki. 78 s.
- Ståhl, G. 1992. En studie av kvaliteten i skogliga avdelningsdata som samlats med subjektiva inventeringsmetoder. *Sveriges Landbruksuniversitet, Institutionen för biometri och skogsindelning, Rapport* 24. 128 s.
- Tarkistusinventoinnin maastotyöohje. 1998. Enso Oyj, metsäkonttori. 12 s.
- TASO. Maastotyöopas. 1993. Metsäkeskus Tapio, Helsinki. 50 s.
- Utterä, J., Maltamo, M., Kurki, S. & Mykrä, S. 1998. Differences in forest structure and landscape patterns between ownership groups in Central Finland. *Boreal Environmental Research* 3: 191–200.
- , Hiltunen, J., Rissanen, P., Anttila, P. & Hyvönen, P. 2002. Uudet kuvioittaisen arvioinnin menetelmät – arvio soveltuvuudesta yksityismaiden metsäsuunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 523–531.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männyille, kuuselle ja koivulle. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yliopisto. 59 s. + liitteet 29 s.