



Antti Saari



Annika Kangas

Antti Saari ja Annika Kangas

Kuvioittaisen arvioinnin harhan muodostuminen

Saari, A. & Kangas, A. 2005. Kuvioittaisen arvioinnin harhan muodostuminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2005: 5–18.

Aiemmissa tutkimuksissa relaskooppiä käyttäen mitattujen pohjapinta-alojen ja tilavuuksien on havaittu olevan lieviä aliarvioita, etenkin kuusikoissa. Harhassa on havaittu myös selkeää trendi: vähäpuustoisilla kuvioilla arviot ovat yliarvioita, ja suuripuustoisilla kuvioilla taas aliarvioita. Havaittujen aliarvioiden syyksi on arveltu mm. heikosta näkyvyydestä aiheutuvaa mittausvirhettä, suunnittelijoiden varovaisuutta sekä valittujen havaintopisteiden epäedustavuutta. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu myös pohjapinta-alan arvioiden kasvavan systemaattisesti relaskooppi-kertoimen kasvaessa. Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään mitkä ovat ilmiön syyt. Hyyttälän metsäasemalla järjestetyssä kokeessa 24 suunnittelun ammattilaista mittasi kukin 9 kuviota, joiden joukkoon valittiin erityisen suuripuustoisia kohteita. Kullekin kuviolle tehtiin systemaattinen koealaotanta, josta laskettiin kuvion puustotiedot. Kokeessa suunnittelijat merkitsivät maastoon mittaamiensa relaskooppi-koealojen paikat, ja kirjasivat mittaustulokset. Näiden havaintojen keskiarvona saatiin kullekin kuviolle toinen puustoarvio. Kolmantena arviona oli suunnittelijan harkintaa edustava kuvion keskimääräinen arvio. Lisäksi kaikista merkityistä ja löydettyistä mittauspisteistä tehtiin tarkistusmittaus, josta saatiin kuviolle neljäs puustoarvio. Näiden mittausten perusteella virhe jaettiin kolmeen komponenttiin: mittausvirhe, harkinnanvaraisesta arviosta johtuva virhe sekä jäännösvirhe, joka sisältää koealojen sijoittelusta johtuvat sekä muut mahdolliset virheet. Tuloksissa havaittiin sama harhan trendi kuin aiemmissakin tutkimuksissa. Ylivoimaisesti suurin virheen komponentti tässä tutkimuksessa oli mittausvirhe. Suuripuustoisilla kuvioilla, mitattaessa puita pienillä relaskooppi-kertoimilla, näyttää osa puista jäävän havaitsematta. Näissä metsissä kannattaisikin käyttää 2 tai jopa 4 m²/ha relaskooppi-kertoiminta.

Asiasanat: metsänarviointi, mittausvirheet, arviointivirheet, harha, luotettavuus, tarkkuus, trendi
Yhteystiedot: Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto
Sähköposti annika.kangas@helsinki.fi
Hyväksytty 11.3.2005

I Johdanto

I.1 Kuvioittainen arviointi nykyään

Yksityismetsien suunnittelulla pyritään tuottamaan metsänomistajalle tietoa tilan metsien nykytilasta ja tulevasta kehityksestä sekä metsän käyttövaihtoehdoista. Tilakohtaisten metsäsuunnitelmien puusto- ja kasvupaikkatiedot kerätään nykyisen käytännön mukaisesti kuvioittaisella arvioinnilla. Metsäkeskukset ja metsänhoitoyhdistykset ovat tehneet tilakohtaisia yksityismetsien metsäsuunnitelmia viime vuosina noin 0,9 miljoonaa hehtaaria vuodessa (Uuttera ym. 2002). Yksityismetsien metsäsuunnittelun lisäksi kuvioittaista arviointia tehdään vuosittain Metsähallituksen ja metsäyhtiöiden metsissä.

Kuvioittaisessa arvioinnissa suunniteltavana oleva metsäalue jaetaan kasvupaikaltaan ja puustoltaan homogeenisiin kuvioihin. Homogeenisuuden lisäksi kuvioiden tulee olla kooltaan ja muodoltaan sellaisia, että ne toimivat järkevinä inventointi- ja toimenpidetyksikköinä. Alustava kuviointi tehdään ilmakuvalta, jota korjataan ja täydennetään maastossa (Mäkelä 1999). Kuvioinnin jälkeen jokaiselta kuviolta mitataan ja arvioidaan kasvupaikkaa ja puustoa kuvaavat tunnuksat. Puustoa kuvaavat tunnuksat, kuten pohjapinta-ala, keskipituus, ikä ja keskiläpimitta, arvioidaan nykykäytännön mukaisesti puusto- ja puulajiositteittain. Keskipituus ja keskiläpimitta mitataan pohjapinta-alamediaanipuusta. Tunnuksat voidaan määrittää myös puusto-ositteittain siten, että määritetään erikseen puulajin osuus prosentteina puusto-ositteesta. (Solmu-maastotyöopas 2000)

Kansallisessa metsäohjelmassa tavoitteeksi asetettiin vuosittaisen metsäsuunnittelualan nostaminen miljoonaan hehtaariin (Maa- ja metsätalousministeriö, KMO). Tulevaisuudessa metsäsuunnittelun tietotarve monipuolistuu ja metsäsuunnittelun saama valtion tuki mahdollisesti pienenee. Vuosittaisen metsäsuunnittelualan kasvattaminen yhdessä monipuolistuneen tietotarpeen ja pienenevän valtion tuen kanssa pakottavat metsäsuunnittelun maastotöiden kehittämiseen ja kustannusten pienentämiseen (Oksanen-Peltola 1999). Nykyisellään maastotyöt muodostavat suurimman osan metsäsuunnittelun kustannuksista. Vuonna 2000 suunnittelun kokonaiskustannukset olivat 17,83 €/ha, josta maasto-

töiden osuus oli 7,9 €/ha (Uuttera ym. 2002).

Vaikka maastotyöt muodostavat suurimman osan metsäsuunnittelun kustannuksista, maastossa kerätty tieto on usein varsin epätarkkaa (mm. Laasasenaho ja Päivinen 1986, Haara ja Korhonen 2004). Maastointientien tarkkuuden parantamiseksi yhdessä suunnittelun kasvavien tuottovaatimusten kanssa, tarvitaan tutkimustietoa kuvioittaisen arvioinnin epätarkkuudesta, sen syistä ja keinoista, joilla tarkkuutta voidaan parantaa.

I.2 Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus

Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuutta on tutkittu Suomessa runsaasti. Laasasenaho ja Päivinen (1986) havaitsivat pohjapinta-alassa 16–21 %:n ja tilavuudessa 17–24 %:n keskineliövirheet. Tutkimuksessa verrattiin metsäyhtiöiden metsissä tehtyä kuvioittaista arviointia systemaattisella ympyräkoelaverkolla saatuihin tuloksiin. Pääpuulajin vaikutusta kuvioittaisen arvioinnin luotettavuuteen tutkittaessa havaittiin, että männiköt arvioitiin kuusikoita luotettavammin (Laasasenaho ja Päivinen 1986). Haaran ja Korhosen (2004) tutkimuksessa, joka oli tehty käyttäen nykyistä puulajiositteista puuston arviointia, keskineliövirhe pohjapinta-alassa oli 20,2 % ja tilavuudessa 25,1 %. Aineisto tässä tutkimuksessa oli metsäkeskusten tekemästä kuvioittaisesta arvioinnista.

Relaskooppiä käyttäen mitattujen pohjapinta-alojen ja tilavuuksien on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa olevan lieviä aliarvioita ympyräkoelaloilta saatuihin tuloksiin verrattuna (Nyyssönen ym. 1967, Poso 1983, Haara ja Korhonen 2004). Aliarviot olivat suurimmat kuusella. Männyllä saatiin vastaavasti lievä yliarvio. Kuusikoissa havaittujen aliarvioiden syyksi on arveltu heikosta näkyvyydestä aiheutuvaa mittausvirhettä (Haara ja Korhonen 2004). Mähösen (1984) tutkimuksessa havaittiin relaskooppi kertomella 1 saatujen pohjapinta-alan arvioiden olevan systemaattisesti 3,4 m²/ha pienempiä kuin kertoimella 2 ja 4 saadut tulokset. Kuusikoissa erot kertomella yksi saatujen tulosten ja kertoimella 2 ja 4 saatujen tulosten välillä olivat suurimmat. Samankaltaisia tuloksia ovat saaneet myös Laasasenaho ja Päivinen (1986). He arvelivat kertoimella 1 saatujen aliarvioiden johtuvan huonosta näkyvyydestä, pui-

den jäämisestä toistensa taakse ja koealan ulottumisesta toiselle, harvapuustoisemmalle kuviolle.

Aikaisemmissa tutkimuksissa (esim. Ventola 1980, Mähönen 1984, Ståhl 1992, Pigg 1994 ja Haara ja Korhonen 2004) on havaittu kuvioittaisen arvioinnin harhassa selkeä trendi: arviointi tuottaa lieviä yliarvioita puuston pohjapinta-alasta ja tilavuudesta pohjapinta-alaltaan ja keskitilavuudeltaan pienillä kuvioilla. Pohjapinta-alan kasvaessa tulokset muuttuivat aliarvioiksi. Haaran ja Korhosen (2004) tutkimuksessa arviointivirhe muuttui aliarvioksi pohjapinta-alan ylittäessä 20 m²/ha. Suurimmillaan arviointivirhe oli yli 35 m²/ha:n luokassa, jossa se oli 8 m²/ha:n aliarvio. Tilavuuden kohdalla tulokset ovat saman suuntaisia. Keskitilavuudeltaan pienillä kuvioilla saatiin lieviä yliarvioita. Arviointivirhe muuttuu aliarvioksi 150–200 m³/ha:n luokassa. Tilavuuden ollessa yli 300 m³/ha saatiin tilavuudessa selvä aliarvio. Ventolan (1980) tutkimuksessa havaittiin alle 100 m³/ha:n metsiköissä pieni yliarvio tilavuudesta. Suuremmilla tilavuuksilla arviointivirhe muuttui aliarvioksi. Puustoisuuden myötä muuttuvan harhan vuoksi kuvioittaisen arvioinnin tulokset antavat metsien puustoisuudesta todellista keskiarvoisemman kuvan. Erityisesti suuret aliarviot puustoisilla kuvioilla vaikuttavat voimakkaasti metsän käsittelytoimenpiteitä valittaessa ja hakkuusuunnitteita laskettaessa.

Kuvioittaisella arvioinnilla kerättyä tietoa käytetään metsikön kehityksen ja kasvun ennustamisessa. Nykyisen käytännön mukaisesti ensimmäisen kauden ennustettavia muuttujia käytetään seuraavan kauden ennusteen lähtötietoina. Tällöin mitauksessa tehdyt virheet kumuloituvat jokaisella simulointikierroksella (Mowrer ja Frayer 1986). Kasvatusmallien merkityksen kasvaessa metsäsuunnittelussa on tärkeää, että virheiden kumuloituminen simulointikierroksilla otetaan huomioon.

Jos kuvioittaisen arvioinnin harhan syyt pystyttäisiin selvittämään, voitaisiin mahdollisesti metsäsuunnittelijoiden koulutuksella tai harhan mallintamisella saada aikaisempaa luotettavampia tuloksia. Koska harhan suunta ja suuruus vaihtelevat puustotunnusten mukaan, on myös mahdollista, että harhan syyt vaihtelevat eri tyyppisissä metsiköissä. Tässä tutkimuksessa on tarkoitus selvittää kuvioittaisen arvioinnin luotettavuuden lisäksi arvioinnin harhan syitä ja muodostumisvaihetta

2 Aineisto

2.1 Vertailuaineisto

Tutkimuksen aineisto kerättiin Helsingin yliopiston metsäasemalla Hyytiälässä Juupajoella (61°50'N, 24°18'E) touko–heinäkuussa 2004. Alueelta oli olemassa vääräväri-ilmakuva vuodelta 2002, jota käytettiin ennakkokuvioinnissa. Alueelle muodostettiin ilmakuvan perusteella 9 metsikkökuvioita ja niiden rajat tarkistettiin maastossa. Kuviot valittiin siten, että ne edustivat mahdollisimman erilaisia metsiköitä kuitenkin niin, että painopiste oli suuripuustoisilla kuvioilla, joissa aikaisemmin oli havaittu suurimmat harhat (Haara ja Korhonen 2004). Kuvioihin ei sisällynyt taimikko- eikä ylispuukehitysluokkien metsiköitä.

Kuvioiden pinta-alat vaihtelivat 0,4–2,7 ha välillä. Yhteensä kuvioiden pinta-ala oli 11,5 ha ja kuvioiden keskikoko 1,3 ha. Pinta-alasta 5,2 % oli metsätuotantokelpoista kuivaa kangasta, 13,9 % kuivahkoa kangasta, 58,3 % tuoretta kangasta ja 22,6 % lehtomaista kangasta. Kuviot edustivat näin ollen rehevämpiä metsiä kuin Etelä-Suomessa keskimäärin. Pinta-alasta mäntyvaltaista oli 19,1 %, kuusivaltaista 46,0 % ja koivuvaltaista 34,8 %. Nuorten kasvatusmetsien osuus pinta-alasta oli 28,7 %, varttuneiden kasvatusmetsien osuus 7,8 % ja uudistuskypsien metsien osuus 63,5 %. Tutkimukseen haluttiin mukaan vähä- ja runsaspuustoisia kuvioita, jotta niissä havaittava kuvioittaisen arvioinnin harha pystyttäisiin selvittämään. Tästä syystä uudistuskypsien metsien osuus kasvoi suureksi ja toisaalta varttuneiden kasvatusmetsien osuus jäi pieneksi.

Vertailuaineistoa varten kuvioiden puustotiedot mitattiin systemaattisella ympyräkoelaotannalla. Koelaloilta mitattiin puiden rinnankorkeusläpimitta mittasaksilla yhdestä suunnasta 1 mm:n tarkkuudella kaikista läpimitaltaan yli 5 cm:n puista. Mittaus suoritettiin kohtisuoraan koealan sädettä vastaan. Lisäksi määritettiin jokaisen lukupuun puulaji sekä jokaisen kuvion metsätuotantokelpoisuus ja kehitysluokka. Metsikkörakenteesta johtuen varttuneissa metsissä vastaavaan tarkkuuteen pääsemiseksi pitää käyttää suurempia koealoja. Näin ollen ympyräkoelajen säteet vaihtelivat seuraavasti:

nuoret kasvatusmetsät (02): 5,64 m
varttuneet kasvatusmetsät (03): 7,50 m
uudistuskypsät metsät (04): 10,00 m

Kuvioille muodostettiin pääilmansuuntien mukainen koealaverkko, jonka perusteella kuvioille sijoitettiin 4–9 koealaa kuvion koosta ja kehitysluokasta riippuen. Koealoihin kuuluvan pinta-alan osuus koko kuvion pinta-alasta vaihteli 4,5–47,1 %:n välillä kuvion koosta ja kehitysluokasta riippuen. Lukupuista valittiin pituuskoepuiksi joka viides puu, kuitenkin siten, että kuvion ensimmäiseksi pituuskoepuiksi valittiin kolmas puu. Pituus mitattiin Suunto-hypsometrillä 1 dm:n tarkkuudella.

2.2 Mittauskoeaineisto

Varsinainen tutkimusaineisto kerättiin kaksipäiväisellä mittauskokeella kesäkuussa 2004. Kokeeseen kutsuttiin mittaajiksi työssään kuvioittaista arviointia tekeviä metsäsuunnittelijoita. Mittaajien työkokemusta ei erikseen selvitetty. Kaikkiaan kokeeseen osallistui 24 mittaajaa Pirkanmaan ja Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksista. Pirkanmaan metsäkeskuksen metsäsuunnittelijoista lähes kaikki osallistuivat kokeeseen ja vastaavasti Etelä-Pohjanmaan metsäkeskuksen Alavuden, Lapuan ja Ähtärin metsätöimistöiden metsäsuunnittelijoista lähes kaikki osallistuivat kokeeseen.

Koehenkilöt keräsivät maastossa kuvioiden puustotiedot samoin kuin he tekevät tavanomaisessa kuvioittaisessa arvioinnissa. Mittausvälineinä he käyttivät välineitä, joita ovat tottuneet työssään käyttämään. Kokeen alussa kaikille mittaajille jaettiin alueelta 1:5000 mittakaavassa oleva väärävärililmakuva, johon oli valmiiksi piirretty kuviorajat. Tavanomaisten kuviotietojen lisäksi heitä pyydettiin ilmoittamaan erikseen mittaamansa puustotiedot relaskooppikoealoittain. Lisäksi heitä pyydettiin merkitsemään mittauskohta puulastulla, johon merkittiin koehenkilön ja koealan numero. Mittaajat kirjäsivat kunkin relaskooppikoealan puustotietojen lisäksi koealojen pohjois–itä-koordinaatit. Tähän tarkoitukseen heillä oli kokeen aikana käytössä GPS-paikkantimet. Koordinaattien avulla pyrittiin helpottamaan mittauskohdan löytymistä mittauskokeen jälkeen. Koehenkilöt kiersivät kuviot eri järjestyksessä eri

päivinä. Tällä pyrittiin estämään väsymyksen tai rutinoitumisen vaikutusta tuloksiin.

2.3 Tarkistusmittaukset

Mittauskokeen jälkeen koehenkilöiden merkitsemillä relaskooppikoealoilla suoritettiin tarkistusmittaukset. Relaskooppikoealoilta mitattiin puuston pohjapinta-ala puulajiositteittain. Runsaan pintakavillisuuden vuoksi kaikkia relaskooppikoealoja ei löydetty. Koealojen löytymistä hankaloitti myös GPS-paikannuksen epätarkkuus mittauskokeen aikana. Satelliittien sijainnista johtuen paikannuksen tarkkuus kokeen aikana oli n. 15 m. Kaikkiaan mittauskokeessa mitatuista 743 koealasta löydettiin 605, eli 81,4 %.

3 Menetelmät

3.1 Puustotunnusten laskenta

3.1.1 Puustotunnusten laskenta vertailuaineistosta

Ympyräkoealoilta mitatusta vertailuaineistosta laskettiin puustotunnukset kullekin kuviolle. Jokaiselle puulajiositteelle muodostettiin pituusmallit kuviointain. Pituusmallina käytettiin Näslundin pituuskaivää. Kun jokaiselle lukupuulle oli saatu mallin antama pituus, laskettiin puiden tilavuus Laasasenahon (1982) kahden muuttujan tilavuusyhtälöillä. Koealakohtaiset tilavuudet ja pohjapinta-alat laskettiin koealan lukupuiden summana, jotka muutettiin hehtaariohtaisiksi koealan pinta-alan perusteella. Kuvioittaiset pohjapinta-alat ja tilavuudet laskettiin koealojen keskiarvoina. Vertailuaineiston keskiläpimitta ja keskipituus laskettiin pohjapinta-alamediaanipuun läpimittana ja pituutena.

3.1.2 Puustotunnusten laskenta mittauskokeen aineistosta

Mittauskokeessa mitatut puusto-ositteiset keskiläpimitat, keskipituudet ja pohjapinta-alat syötettiin metsäkeskuksissa käytössä olevaan T-forest-metsä-

suunnitteluohjelmaan. Ohjelmalla laskettiin kuvioittaiset tilavuudet kullekin mittaajalle erikseen. Ohjelma määrittää mitattujen läpimittojen ja pohjapinta-alojen perusteella läpimittajakauman kullekin puusto-ositteelle käyttäen jakauman mallina valmiita todennäköisyysjakaumia.

Vastaavasti määritettiin puustotunnukset tarkistusmittauksen tuloksista ja relaskoopikoealoittain ilmoitetuista tuloksista. Tarkistusmittausten pohjapinta-alana käytettiin mittaajan kuviolla mittaamista kohdista tarkastusmitattujen pohjapinta-alojen keskiarvoja. Keskiläpimittoina ja keskipituuksina käytettiin ympyräkoaloilta mitattuja keskipituuksia ja -läpimittoja. Relaskoopikoealoittain lasketuissa tuloksissa käytettiin kuvion pohjapinta-alana relaskoopikoealoilta mitattujen pohjapinta-alojen keskiarvoa. Koska mittaajat eivät mitanneet keskiläpimittoja ja -pituuksia koealoittain, käytettiin keskiläpimittana ja -pituutena kuvioittain ilmoitettuja tuloksia.

Puustotunnusten laskennan jälkeen jokaiselta kuviolta oli käytettävissä neljät eri puustotunnukset. Ympyräkoaloilta mitattu vertailuaineisto (=vert), mittaajien ilmoittamat kuvioittaiset puustotunnukset (=kuv), relaskoopikoealoittain ilmoitettujen pohjapinta-alojen mukaan lasketut (=rel) ja relaskoopikoealoilta tarkistusmitatut tulokset (=tark).

3.2 Kuvioittaisen arvioinnin keskihajonnat ja harha

Kuvioittaisen arvioinnin keskihajonta laskettiin mittaajien ilmoittamien tulosten välisenä hajontana. Kuvioittaisen arvioinnin harha puolestaan laskettiin kuvioittaisen arvioinnin keskiarvojen poikkeamana vertailuaineistosta (kaava 1).

$$\text{Harha} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)}{nm} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{nm} - \frac{\bar{S}_{vy}^2}{\bar{k}}} \quad (2)$$

y_{ij} = tunnuksen y kuvioittaisessa arvioinnissa havaittu arvo kuviolla i ja mittaajalla j .

\bar{y}_i = tunnuksen y ympyräkoaloilta mitattu keskiarvo kuviolla i

n = kuvioiden lukumäärä

m = mittaajien lukumäärä

\bar{k} = kuvioiden keskimääräinen ympyräkoalojen lukumäärä vertailuaineistossa

\bar{S}_{vy}^2 = vertailuaineiston keskimääräinen kuvion koealojen sisäinen varianssi muuttujalla y

Keskivirhe (RMSE) pitää sisällään kuvioittaisen arvioinnin satunnaisen ja systemaattisen virheen. Koska vertailuaineistokin on tuotettu otannalla, sisältää sekin otantavirhettä. Jos vertailuaineiston otantavirhettä ei huomioida, saadaan kuvioittaisen arvioinnin keskivirheestä yliarvio. Vertailuaineiston otantavirhe huomioidaan keskivirheen laskennassa kaavan 2 mukaisesti (Laasasenaho ja Päivinen 1986).

3.3 Virheen jakaantuminen

Kuvioittaisen arvioinnin kokonaisvirhe (=vkok) määritettiin vertaamalla vertailuaineiston puustotietoja kuvioittaisen arvioinnin tuloksiin (vkok = kuv - vert). Kokonaisvirhe määritettiin pohjapinta-alassa, keskiläpimitassa, keskipituudessa ja tilavuudessa. Kokonaisvirhe pitää sisällään mittaajien tekemän mittausrvirheen, koealojen sijoittelusta johtuvan virheen ja mittaajien saamiinsa tuloksiin tekemän korjauksen eli ns. näkemyksen. Tilavuudessa on lisäksi mukana vertailuaineiston ja mittauskokeen aineiston erilaisista puustotunnusten laskentatavoista johtuvaa mallivirhettä. Mallivirheen oletettiin olevan kuitenkin niin pieni, että se jätettiin huomiotta, kuten muissakin vastaavissa tutkimuksissa (Laasasenaho ja Päivinen 1986, Haara ja Korhonen 2004). Koska mittaajat olivat ilmoittaneet koealakohtaiset keskiläpimitat ja -pituudet hyvin vaihtelevasti, ainoastaan pohjapinta-alassa ja tilavuudessa havaitut virheet pystyttiin jakamaan komponentteihinsa. Muiden tunnusten kohdalla voitiin määrittää ainoastaan kokonaisvirhe. Kokonaisvirhettä sekä sen komponentteja tarkasteltiin sekä kuvioittain että mittaajittain. Kuviokohtaiset virheet laskettiin mittaajien kuviolla tekemien virheiden keskiarvona ja mittaajakohtaiset virheet laskettiin mittaajan kaikilla kuviolla teke-

mien virheiden keskiarvona.

Mittaajien tekemien mittausvirheiden (= *vmit*) määrittämiseksi relaskooppikoealoilla suoritettiin tarkistusmittaukset. Tarkistusmitattuja tuloksia verrattiin tämän jälkeen mittaajien ilmoittamiin relaskooppikoealakohtaisiin tuloksiin; mittausvirhe saatiin näiden erotuksesta ($vmit = rel - tark$). Koska kaikkia relaskooppikoealoja ei maaston peitteisyyden vuoksi löydetty, jouduttiin löytämättä jääneiden koealojen mittausvirheet estimoimaan löydettyjen ja tarkistusmitattujen koealojen mittausvirheiden perusteella. Puuttuvien tarkistusmittausten estimoinnissa käytettiin lähimmän naapurin menetelmää (nn method) (Moeur ja Stage 1995). Löytämättä jääneelle koealalle haettiin pohjapinta-alaltaan lähinnä samanlainen tarkistusmitattu koeala samalta kuviolta ja samalta mittaajalta. Käytetty etäisyysfunktio oli muotoa:

$$Etäisyys_{ij} = |G_i - G_j| \quad (3)$$

G_i = löytymättä jääneen koealan mittauskokeessa havaittu pohjapinta-ala

G_j = naapurikoealan mittauskokeessa havaittu pohjapinta-ala

Kahdessa tapauksessa kuviolta ei löydetty yhtään kyseisen mittaajan koealaa. Tällöin mittausvirhe estimoitettiin muiden mittaajien samalla kuviolla tekemien mittausvirheiden perusteella. Mittausvirheenä käytettiin muiden mittaajien sillä kuviolla tekemien mittausvirheiden keskiarvoa.

Metsäsuunnittelijat voivat muuttaa mittaamia puustotunnuksia, jos ne eivät heidän mielestään vastaa kuvion todellisia keskimääräisiä tunnuksia. Tämä korjaus (= *vkor*) ja siitä mahdollisesti johtuva virhe määritettiin kuvioittaisen arvioinnin tulosten ja relaskooppikoealoittain ilmoitettujen ja niiden perusteella laskettujen kuvioittaisten tulosten erotuksena ($vkor = kuv - rel$).

Koealojen sijoittelusta johtuva virhe (= *vsij*) määritettiin jäännösvirheenä. Kokonaisvirheestä vähennettiin ensiksi mittausvirhe ja mittaajien tekemä korjaus ($vsij = vkok - vmit - vkor$). Jäljelle jäänyt virhe muodostuu koealojen sijoittumisesta epäedustaviin kohtiin kuviolla. Tämä virhe pitää sisällään näin ollen sekä otantavirheen että mahdollisesti systemaattisesta sijoittelusta johtuvan virheen. Myös

vertailuaineiston otantavirhe on mukana tässä virheen osassa samoin kuin puustotunnusten erilaisista laskentatavoista johtuva mallivirhe. Sijoittelusta johtuva virhe on siis lievä yliarvio todellisesta virheestä.

3.5 Mallit

Aineiston perusteella pohjapinta-alan kokonaisvirheestä (*vkok*) ja mittausvirheestä (*vmit*) muodostettiin matemaattiset mallit, jotka kuvaavat harhan trendiä aineistossa. Mallien avulla pyrittiin selvittämään, mitkä tekijät vaikuttavat näihin virheisiin. Oletuksena oli, että ainakin puuston pohjapinta-ala ja mahdollisesti myös keskiläpimita vaikuttavat virheisiin. Lisäksi on mahdollista, että mittaajien välillä on virheessä tasoeroja. Saman mittaajan tekemät virheet voivat olla keskenään korreloituja. Kuvioiden välillä voi myös olla muista kuin pohjapinta-alasta ja läpimitasta johtuvia eroja. Tällaisia eroja voisivat olla mm. alikasvoksen määrä, kuvion topografia ja muut mahdolliset tekijät, jotka vaikuttavat näkyvyyteen kuviolla. Näiden tekijöiden vaikutusta ei aineiston perusteella pystytty erikseen selvittämään, jolloin ne jäivät osaksi kuvion vaikutusta

Koska virheiden mallit pitävät sisällään kiinteitä parametreja (pohjapinta-ala ja keskiläpimita ja niiden muunnokset) ja satunnaisia parametreja (kuvio ja mittaaja), käytettiin mallina sekamallia (Lappi 1993). Sekamalli voidaan kirjoittaa yleisessä vektorimuodossa:

$$y_i = x_i' b + z_i' c + e_i \quad (4)$$

missä y_i on selitettävä muuttuja havainnolla i , x_i' selittäjämuuttujien vektori, b on kiinteiden parametrien vektori, c on satunnaisten parametrien vektori ja e_i on virhevektori. Kun aineisto koostuu luokista, ja satunnaisten parametrien oletetaan vaihtelevan luokasta toiseen, vektorin z_i avulla poimitaan kaikkien luokkien parametrit sisältävästä vektorista c kyseisen luokan parametrit (Lappi 1993).

Virheiden mallien laadinta aloitettiin etsimällä kiinteän osan selittäjät. Mahdollisiksi selittäjiksi valittiin pohjapinta-alan ja keskiläpimitan tosiarvot. Pohjapinta-alassa tosiarvona olivat mittausvirheen

mallissa relaskooppikoealalta tarkistusmitattu pohjapinta-ala ja kokonaisvirheen mallissa ympyräkoaloilta mitattu kuvion keskimääräinen pohjapinta-ala. Koska koealakohtaisia keskiläpimittoja ei ollut käytettävissä, keskiläpimitassa käytettiin molempien mallien tosiarvoina ympyräkoaloilta laskettua koko kuvion keskiläpimittaa. Näistä molemmista tunnuksista tehtiin lisäksi logaritmi-, neliöjuuri ja potenssimuunnoksia. Kiinteän osan lisäksi mallissa oli mukana satunnaisosa, jossa oli mukana mittaajaa ja kuviota kuvaavat varianssikomponentit. Se osa vaihtelusta, jota kiinteä osa ei selitä, jaettiin satunnaisosassa mittaajien ja kuvioiden väliseen satunnaiseen vaihteluun ja jäännösvaihteluun.

4 Tulokset

4.1 Kuvioittaisen arvioinnin hajonta ja harha

Taulukossa 1 on esitetty mittauskokeessa havaitut kuvioittaisen arvioinnin harhat ja hajonnat. Kuvioittaisen arvioinnin hajonnalla tarkoitetaan mittauskokeessa havaittua mittaajien välistä hajontaa. Se kuvaa mittaajien tekemää satunnaisvirhettä (kaava 2). Kuvioittaisen arvioinnin harhalla tarkoitetaan mittauskokeen tulosten keskimääräistä poikkeamaa ympyräkoaloilta mitatuista tuloksista. Positiiviset harhat tarkoittavat yliarviota ja negatiiviset aliarviota (Schreuder ym. 1993). Harha kuvaa mittaajien

Taulukko 1. Puustotunnusten hajonnat, harhat ja keskineliövirheet absoluuttisina sekä keskiarvoon suhteutettuna. Positiiviset harhat tarkoittavat yliarviota ja negatiiviset aliarviota.

		Kuvioittaisen arvioinnin hajonta	Kuvioittaisen arvioinnin harha	Keskivirhe RMSE
Pohjapinta-ala	m ² /ha	2,81	-5,75	6,77
	%	12,67	-20,36	24,00
Läpimitta	cm	1,76	1,53	2,62
	%	8,19	7,38	12,62
Pituus	m	1,29	0,24	1,85
	%	7,89	1,29	10,02
Tilavuus	m ³ /ha	30,85	-71,96	78,16
	%	15,68	-25,22	27,39

tekemää keskimääräistä systemaattista virhettä. Harha laskettiin tässä tutkimuksessa kaavan 1 mukaisesti.

Puustotunnuksista pohjapinta-alassa tehtiin selvä aliarvio. Tämä heijastui selvänä aliarviona myös tilavuudessa. Läpimitassa ja pituudessa tehtiin molemmissa lievät yliarviot. Pohjapinta-alan ja tilavuuden selvät aliarviot kasvattavat myös näiden tunnusten keskineliövirhettä. Tarkemmin puustotunnuksissa tehdyt virheet ja puustotunnusten harhat on esitetty taulukossa 1.

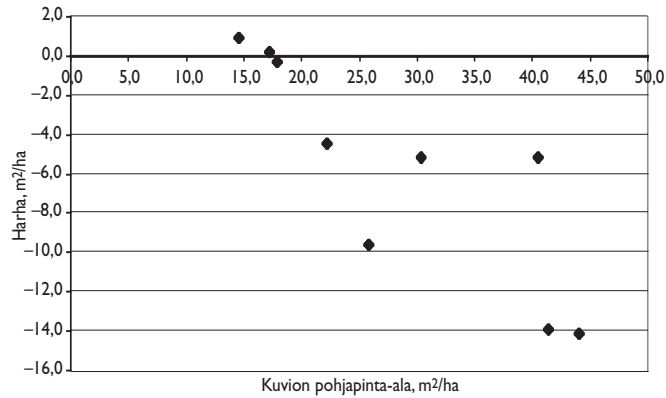
Pohjapinta-alassa saatiin vähäpuustoisimmilla kuviolla lievä yliarviot. Yliarviot muuttui aliarvioksi, kun kuvion todellinen pohjapinta-ala kasvoi yli 17,2 m²/ha. Todella suuripuustoisilla kuvioilla pohjapinta-alassa saatiin selkeä aliarvio. Suurimmillaan aliarvio oli kuviolla 3, jossa se oli 14,2 m²/ha. Todellinen pohjapinta-ala tällä kuviolla oli 44,1 m²/ha. Myöskin kuvioilla 4 ja 5 todellinen pohjapinta-ala oli poikkeuksellisen korkea. Näillä kuvioilla pohjapinta-alasta tuli myös selkeä aliarvio (kuva 1). Pohjapinta-alan harhan ja puuston keskiläpimitan välillä havaittiin myös voimakas yhteys. Kuviolla 1 tehtiin pohjapinta-alassa selkeä aliarvio, 9,6 m²/ha. Tämä selittyy pohjapinta-alaan nähden poikkeuksellisen suurella keskiläpimitalla: 30,5 cm (kuva 2).

Pohjapinta-alassa havaitut harhat heijastuivat myös puuston tilavuuden harhaan kuviolla. Runsaspuustoisilla kuvioilla tilavuudessa saatiin selkeitä aliarvioita. Suurimmillaan tilavuuden aliarvio oli kuviolla 3, jossa se oli 202 m³/ha. Kuvion todellinen tilavuus oli poikkeuksellisen suuri, 556 m³/ha (kuva 3).

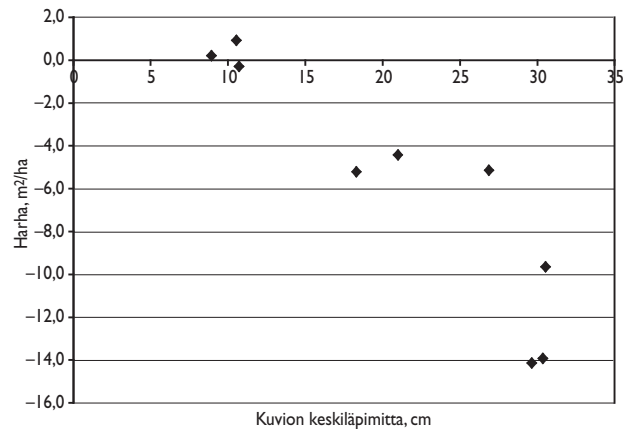
4.2 Virheen jakaantuminen

4.2.1 Pohjapinta-alan virhe

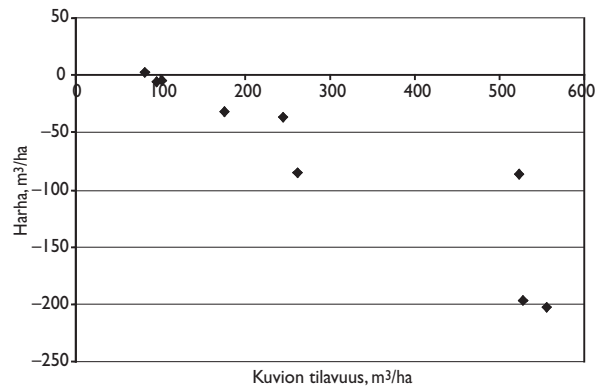
Aineiston perusteella pohjapinta-alassa havaittu virhe oli mahdollista jakaa komponentteihinsa. Mittausvirhe laskettiin mittaajien koealoittain ilmoittamien tulosten ja tarkistusmitattujen pohjapinta-alojen erotuksena. Korjaus määriteltiin koealoittain ilmoitettujen tulosten ja kuvioittaisen arvioinnin tulosten erotuksena. Sijoittelusta aiheutuva virhe määriteltiin jäännösvirheenä. Kokonaisvirheestä vähennettiin mittausvirhe sekä korjauksesta aiheutuva virhe.



Kuva 1. Pohjapinta-alan harha kuvioittaisessa arvioinnissa kuvion todellisen pohjapinta-alan funktiona. Negatiiviset arvot tarkoittavat aliarviota ja positiiviset yliarviota.



Kuva 2. Pohjapinta-alan harha kuvioittaisessa arvioinnissa kuvioiden todellisen keskiläpimitan funktiona. Negatiiviset arvot tarkoittavat aliarviota ja positiiviset yliarviota.



Kuva 3. Tilavuuden harha kuvioittaisessa arvioinnissa kuvioiden todellisen tilavuuden funktiona. Negatiiviset arvot tarkoittavat aliarviota ja positiiviset yliarviota.

Taulukko 2. Kuvioittaisen arvioinnin pohjapinta-alan kokonaisvirheen jakaantuminen mittausvirheeseen, sijoittelusta aiheutuvaan virheeseen ja mittajien mittaustuloksiin tekemään korjaukseen kuvioittain.

Kuvio	Pohjapinta-ala, m ² /ha	Keski- läpimitta, cm	Mittaus- virhe, m ² /ha	Sijoittelu, m ² /ha	Korjaus, m ² /ha	Kokonais- virhe, m ² /ha
1	25,9	30,5	-6,9	-2,6	-0,1	-9,6
2	22,2	21	-3,1	-1,2	-0,1	-4,4
3	44,1	29,6	-11,2	-3,4	0,4	-14,2
4	41,4	30,4	-12,5	-1,4	0,0	-13,9
5	40,6	26,9	-3,2	-1,6	-0,4	-5,2
6	17,2	8,9	-0,3	0,5	0,1	0,2
7	14,5	10,5	-0,1	1,4	-0,4	0,9
8	30,3	18,3	-4,1	-1,3	0,2	-5,2
10	17,9	10,7	-1,6	-0,8	2,0	-0,3

Jäljelle jäänyt virheen osa muodostui koalojen sijoittelusta kuviolle.

Pohjapinta-alassa havaitun kuviokohtaisen harhan jakaantuminen vaihteli kuvioiden välillä (taulukko 2). Lähes kaikilla kuvioilla, joiden tulokset olivat harhaisia, mittausvirheestä aiheutuva virhe oli merkittävin. Kuviolla 3, jossa pohjapinta-alan harha oli suurin, mittausvirheestä aiheutui 11,2 m²/ha aliarvio. Myös kuviolla 1, jossa oli pohjapinta-alaan nähden poikkeuksellisen järeä puusto, mittausvirhe selitti suurimman osan kokonaisvirheestä. Kuviolta mitatut pohjapinta-alat olivat keskimäärin 9,6 m²/ha aliarvioita, josta mittausvirheen osuus oli 6,9 m²/ha. Ainoastaan kuviolla 10 mittaustuloksiin tehty korjaus oli merkittävä. Mittausvirheestä ja sijoittelusta johtuneet 1,5 m²/ha ja 0,8 m²/ha aliarviot korjattiin 2,0 m²/ha ylöspäin, jolloin kokonaisvirheeksi jäi 0,3 m²/ha aliarvio. Kuvion kymmenen puusto oli melko heterogeenistä, mikä lienee syynä kuviolla mitattuihin tuloksiin tehtyihin korjauksiin.

Kun aineisto jaettiin pohjapinta-alaluokkiin, havaittiin selkeämmin kokonais- ja mittausvirheen kasvu kuvion pohjapinta-alan kasvaessa (taulukko 3). Pienimmässä pohjapinta-alaluokassa tehtiin yliarvio. Luokassa 20–30 m²/ha virhe muuttui aliarvioksi. Luokassa yli 30 m²/ha aliarvio oli jo 9,6 m²/ha. Mittausvirheessä tehtiin pienimmässäkin pohjapinta-alaluokassa 0,7 m²/ha aliarvio. Aliarvio kasvoi pohjapinta-alan kasvaessa, ollen suurimmasa pohjapinta-alaluokassa 7,7 m²/ha. Keskiläpimitaluokittain pohjapinta-alan virheen jakautumista tarkasteltaessa havaittiin kokonais- ja mittausvir-

Taulukko 3. Pohjapinta-alan kokonaisvirheen jakaantuminen mittausvirheeseen, sijoittelusta johtuvaan virheeseen ja mittajien tekemään korjaukseen pohjapinta-alaluokittain.

Pohjapinta- alaluokka	Mittausvirhe, m ² /ha	Sijoittelu, m ² /ha	Korjaus, m ² /ha	Kokonais- virhe, m ² /ha
<20	-0,7	0,4	0,6	0,3
20–30	-5,0	-1,9	-0,1	-7,0
30<	-7,7	-1,9	0,0	-9,6

Taulukko 4. Pohjapinta-alan kokonaisvirheen jakaantuminen mittausvirheeseen, sijoittelusta johtuvaan virheeseen ja mittajien tekemään korjaukseen läpimittaluokittain.

Läpimitta- luokka	Mittausvirhe, m ² /ha	Sijoittelu, m ² /ha	Korjaus, m ² /ha	Kokonais- virhe, m ² /ha
<15	-0,7	0,4	0,6	0,3
15–25	-3,6	-1,2	0,0	-4,8
25<	-8,5	-2,2	0,0	-10,7

heen kasvavan vielä selvemmin läpimitan kasvaessa (taulukko 4). Pienimmässä läpimittaluokassa pohjapinta-alassa saatiin 0,3 m²/ha yliarvio. Suurimmassa läpimittaluokassa aliarvio oli jo 10,7 m²/ha.

Pohjapinta-alan kokonaisvirheen jakautumista tarkasteltiin myös mittajittain. Mielenkiinnon kohteena oli, onko mittajien välillä selviä tasoeroja pohjapinta-alan virheessä ja vaihtelevatko virheen syyt mittajien välillä. Pohjapinta-alan kokonaisvirheessä havaittiin mittajien välillä tasoeroja. Kaikki mittajat aliarvioivat mittauskokeen kuvioiden puus-

ton. Suurimmillaan mittaajakohtainen aliarvio oli 10,5 m²/ha ja pienimmillään 3,1 m²/ha. Mittaajista 88 %:lla pohjapinta-alan aliarvio oli välillä 5–10 m²/ha. Lähes kaikilla kokeeseen osallistuneilla mittaajilla mittausrvirhe oli suurin pohjapinta-alan virheen aiheuttaja. Ainoastaan mittaajilla 8 ja 14 sijoittelusta aiheutunut virhe oli suurempi. Mittausvirheestä aiheutunut virhe vaihteli välillä –2,0...–8,9 m²/ha. Korjauksesta aiheutunut virhe oli kaikilla mittaajilla lähes olematon.

4.2.1 Tilavuuden virhe

Tilavuuden kokonaisvirhe jaettiin komponentteihin samaan tapaan kuin pohjapinta-alan kokonaisvirhe. Tilavuudessa saadut tulokset vastaavat suurelta osin pohjapinta-alassa saatuja tuloksia. Kuten pohjapinta-alassa, myös tilavuudessa suurimmat virheet tehtiin kuvioilla 3 ja 4, joiden todellinen tilavuus oli poikkeuksellisen suuri. Mittausvirhe selitti suurimman osan myös tilavuuden virheestä. Kuvioilla 3, 4 ja 5 myös koealojen sijoittelu aiheutti aliarviota tuloksiin. Mittaajien tekemä korjaus oli kaikilla kuvioilla lähes merkityksetön kuviota 10 lukuun ottamatta. Kuvioilla tehdyt virheet vaihtelivat 202 m³/ha aliarviosta 3 m³/ha yliarvioon. Jaettaessa kuviot tilavuusluokkiin (taulukko 5) havaittiin selkeämmin tilavuuden vaikutus kokonais- ja mittausrvirheeseen. Tilavuuden ollessa alle 100 m³/ha tilavuus arvioitiin keskimäärin oikein. Luokan tilavuuden kasvaessa tilavuuden aliarviot kasvavat. Tilavuuden ollessa 400 m³/ha aliarvio on jo 162,2 m³/ha. Sijoittelusta ja korjauksesta johtuvat virheet ovat suurinta tilavuusluokkaa lukuun ottamatta vähäisiä.

Tilavuuden virhettä tarkasteltiin myös mittaajittain. Tulokset vastasivat suurelta osin pohjapinta-alassa saatuja tuloksia. Mittaajakohtaiset systemaattiset aliarviot mittauskokeessa vaihtelivat 44 m³/ha ja 111 m³/ha välillä. Mittausvirhe oli suurin yksittäinen virheen aiheuttaja kaikilla mittaajilla. Mittausvirheet vaihtelivat välillä –22...–107 m³/ha. Sijoittelusta aiheutui suurella osalla mittaajista lievää aliarviota. Mittaustuloksiin tehty korjaus oli kaikilla mittaajilla lähes merkityksetön ja aiheutunee suurelta osin pyörästysvirheestä. Tilavuuden harha komponentteihin jaettuna on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 5. Tilavuuden kokonaisvirheen jakaantuminen mittausrvirheeseen, sijoittelusta johtuvaan virheeseen ja mittaajien tekemään korjaukseen tilavuusluokittain.

Tilavuusluokka	Mittausvirhe, m ³ /ha	Sijoittelu, m ³ /ha	Korjaus, m ³ /ha	Kokonaisvirhe, m ³ /ha
<100	–3,9	2,7	–0,5	–1,7
100–200	–19,9	–2,3	4,1	–18,2
200–400	–61,4	1,5	–0,8	–60,7
>400	–123,6	–32,9	–1,3	–162,2

Taulukko 6. Kuvioittaisen arvioinnin tilavuuden kokonaisvirheen jakaantuminen mittausrvirheeseen, sijoittelusta aiheutuvaan virheeseen ja mittaajien mittaustuloksiin tekemään korjaukseen mittaajittain.

Mittaaja	Mittausvirhe, m ³ /ha	Korjaus, m ³ /ha	Sijoittelu, m ³ /ha	Kokonaisvirhe, m ³ /ha
1	–67,1	1,3	–14,5	–80,2
2	–52,6	–2,6	–19,2	–74,4
3	–63,1	0,5	2,7	–59,9
4	–38,1	–2,0	–16,7	–56,7
5	–22,2	–4,7	–17,9	–44,8
6	–47,6	3,9	–11,5	–55,2
7	–107,4	5,9	–10,2	–111,7
8	–41,2	–5,6	–9,9	–56,6
9	–52,2	–15,1	–11,4	–78,7
10	–38,8	1,2	–14,4	–51,9
11	–94,3	–1,6	–8,1	–104,0
12	–59,3	0,1	–14,9	–74,2
13	–96,2	0,4	–13,0	–108,9
14	–37,3	–2,9	–18,0	–58,2
15	–61,8	4,3	–11,3	–68,8
17	–72,7	0,6	–9,9	–81,9
18	–57,8	6,6	–12,0	–63,2
19	–90,4	2,6	–15,0	–102,8
20	–60,8	14,6	–13,9	–60,1
21	–42,8	–3,3	–21,4	–67,5
22	–43,4	–1,4	1,9	–43,0
23	–67,9	5,2	–6,5	–69,3
25	–69,2	–4,6	–7,3	–81,1
26	–55,2	0,0	–18,9	–74,1

4.4 Mallit

4.4.1 Kokonaisvirhemalli

Pohjapinta-alan kokonaisvirheelle (*vkok*) laadittiin varianssikomponenttimalli, jonka kiinteän osan selittäjiksi valittiin kuvion todellinen pohjapinta-ala (*G*) ja kuvion todellisen keskiläpimitan (*d*) neliö. Nämä muuttujat selittävät suurimman osan koko-

Taulukko 7. Pohjapinta-alan kokonaisvirhemallin kiinteän osan kertoimet ja keskiarvot. Negatiivinen kokonaisvirhe tarkoittaa aliarviota.

Kokonaisvirhe	Estimaatti	Keskiarvo	p-arvo
Vakio	2,8144	2,2107	0,2436
G	-0,07765	0,1218	0,5246
d^2	-0,01183	0,003529	0,001

naisvirheen vaihtelusta. Uusien kiinteiden selittäjien tuominen mukaan malliin ei enää oleellisesti parantanut mallin selitysvahvuutta. Kiinteän osan selittäjien estimaatit ja estimaattien keskiarvot on esitetty taulukossa 7. Kaavassa 5 on esitetty pohjapinta-alan kokonaisvirhemalli sekamallimuodossa.

$$v_{\text{kok}} = 2,8144 - 0,07765G_j - 0,001183d_j^2 + m_i + k_j + e_{ij} \quad (5)$$

$$\text{var}(m_i) = 2,6161 \quad \text{var}(k_j) = 4,0382 \quad \text{var}(e_{ij}) = 5,8364$$

missä m_i on mittaaajaa i kuvaava satunnainen tekijä, k_j on kuviota j kuvaava satunnainen tekijä ja e_{ij} on mallin jäännösvirhe. G_j ja d_j ovat todelliset pohjapinta-ala ja läpimitta kuviolla j . Mallin kiinteän osan mukaisesti pienillä pohjapinta-aloilla ja keskiläpimitoilla pohjapinta-alasta saadaan yliarvio (vakio 2,8144). Pohjapinta-alan ja keskiläpimitan kasvaessa arviointivirhe muuttuu aliarvioksi. Kertoimien tulkintaa vaikeuttaa keskiläpimitan ja pohjapinta-alan korrelaatio. Mittaajien välinen vaihtelu oli selvästi kuvioitten välistä ja jäännösvirheen vaihtelua pienempää.

4.4.2 Mittausvirhemalli

Pohjapinta-alan mittausvirheelle (v_{mit}) laadittiin varianssikomponenttimalli, jonka kiinteän osan selittäjiksi valittiin relaskoopikoalan todellisen pohjapinta-alan (G) neliö ja kuvion todellisen keskiläpimitan (d) neliö. Kiinteän osan selittäjien estimaatit ja estimaattien keskiarvot on esitetty taulukossa 8. Kaavassa 6 on esitetty pohjapinta-alan mittausvirhemalli sekamallimuodossa. Sekä mittaaajaa että kuviota kuvaavat satunnaiset tekijät tulivat mallissa merkitseviksi.

Taulukko 8. Pohjapinta-alan mittausvirhemallin kiinteän osan kertoimet ja keskiarvot. Negatiivinen mittausvirhe tarkoittaa aliarviota.

Mittausvirhe	Estimaatti	Keskiarvo	p-arvo
Vakio	1,9007	1,3058	0,1836
G^2	-0,00465	0,00535	<0,0001
d^2	-0,00542	0,002145	0,0118

$$v_{\text{mit}} = 1,9007 - 0,00465G_{jl}^2 - 0,00542d_j^2 + m_i + k_j + e_{ij} \quad (6)$$

$$\text{var}(m_i) = 1,2043 \quad \text{var}(k_j) = 5,3640 \quad \text{var}(e_{ij}) = 15,4142$$

missä m_i on mittaaajaa i kuvaava satunnainen tekijä, k_j on kuviota j kuvaava satunnainen tekijä ja e_{ij} on mallin jäännösvirhe. G_{jl} on todellinen pohjapinta-ala kuviolla j ja koealalla l . d_j on todellinen keskiläpimitta kuviolla j . Pohjapinta-alasta saadaan mallin mukaisesti koealoilla, joissa on pieni todellinen pohjapinta-ala ja keskiläpimitta, lievä yliarvio (vakio 1,9007). Keskiläpimitan ja pohjapinta-alan kasvaessa mittausvirhe muuttuu aliarvioksi. Myös mittausvirhemallissa mittaajien välinen vaihtelu on selvästi kuvioitten välistä ja jäännösvirheen vaihtelua pienempää.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Kuvioittaisen arvioinnin keskihajonta ja harha

Tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää, mistä aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu kuvioittaisen arvioinnin harha ja harhan trendi johtuvat. Tästä syystä tutkimuksen aineistoon pyrittiin valitsemaan kuvioita, joiden kaltaisissa metsiköissä on aikaisemmin havaittu suurimmat harhat. Tutkimusaineistona olleet kuviot olivat selvästi puustoisempia kuin aikaisemmissa tutkimuksissa ja Suomessa keskimäärin. Pohjapinta-alassa ja tilavuudessa keskimääräiset keskiarvot ja erityisesti harhat tulivatkin selvästi suuremmiksi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa (taulukko 1, Haara ja Korhonen 2004 ja Heikkinen 2002). Tutkimuksen tuloksia ei

voidakkaan tältä osin yleistää kuvioittaiseen arviointiin yleensä. Yleistämistä rajoittaa myös tutkimusaineiston pienuus.

Puuston pohjapinta-alan kasvaessa pohjapinta-alan aliarvio kasvaa. Samankaltaisen ja samaa suuruusluokaa olevan harhan kasvun pohjapinta-alan kasvaessa ovat havainneet myös Haara ja Korhonen (2004). Kun pohjapinta-alan harhaa tarkasteltiin keskiläpimittaluokittain, havaittiin pohjapinta-alan harhan selittyvän kuvion keskiläpimitalla jopa kuvion pohjapinta-alaa paremmin. Kuvion keskiläpimita ja pohjapinta-ala ovat voimakkaasti korreloituneet, mikä vaikeuttaa tulkintaa harhan riippuvuudesta kuvion puustotunnuksista. Pohjapinta-alan harha ja harhan trendi näkyivät myös tilavuuden harhana (kuva 3). Puuston tilavuuden ollessa alle $100 \text{ m}^3/\text{ha}$ tilavuus arvioitiin keskimäärin oikein. Suuremmilla tilavuuksilla tulokset olivat aliarvioita. Haaran ja Korhosen tutkimuksessa (2004) saatiin tilavuudessa lieviä yliarvioita kuvio tilavuuden ollessa alle $150 \text{ m}^3/\text{ha}$. Luokassa $150\text{--}200 \text{ m}^3/\text{ha}$ saatiin $3,6 \text{ m}^3/\text{ha}$ aliarvio. Suurimmassa tilavuusluokassa, $>400 \text{ m}^3/\text{ha}$, aliarvio oli jo n. $100 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Keskiläpimitassa ja keskipituudessa tutkimuksessa havaitut keskineliövirheet ja harhat vastasivat aikaisempia tutkimuksia (taulukko 1). Keskiläpimitassa keskineliövirhe oli $2,62 \text{ cm}$ joka vastasi $12,62 \%$. Aikaisemmissa tutkimuksissa keskiläpimitan keskineliövirheet ovat vaihdelleet välillä $2,3\text{--}3,7 \text{ cm}$ ja $11\text{--}19,6 \%$. Keskipituudessa keskineliövirhe oli $1,85 \text{ m}$, joka vastasi $10,02 \%$. Aineiston painottuminen suuripuustoisiin kuvioihin ei näin ollen vaikuttanut näiden tunnusten mittaamistarkkuuteen.

5.2 Virheen jakaantuminen

Aikaisemmissa tutkimuksissa kuvioittaisen arvioinnin harhan aiheuttavien virheiden syitä ja virheiden muodostumisvaihetta ei ole pyritty selvittämään. Koejärjestelyn ansiosta pohjapinta-alassa ja tilavuudessa havaittu virhe oli tässä tutkimuksessa mahdollista jakaa komponentteihinsa. Tarkasteltavat virheen komponentit olivat mittausrvirhe, koealojen sijoittelusta johtuva virhe ja mittaajien mittaamiinsa tuloksiin tekemä korjaus. Mittaajien tekemä korjaus selvitetiin vertaamalla relaskooppikoealoittain ilmoitettuja tuloksia mittaajan koko kuvion pohja-

pinta-alaksi ilmoittamaan tulokseen. Näin ollen on mahdollista, että mittaajat ovat korjanneet jo koealoittain ilmoittamia tuloksia. Jos näin on, saadaan tällä koejärjestelyllä yliarvio mittausrvirheestä ja toisaalta aliarvio mittaajien tekemästä korjauksesta. Ennen kokeen alkua mittaajille painotettiin, että he kirjaavat koealoittain nimenomaan mittaamansa tulokset ja käyttävät omaa näkemystään vasta koko kuvion pohjapinta-alaa määrittäessään. On kuitenkin mahdotonta sanoa, ovatko he noudattaneet tätä kehotusta. Puulajin vaikutusta virheeseen ei tässä tutkimuksessa havaittu, mikä johtunee aineiston pienuudesta ja puustoisuuden ja puulajin korreloimisesta aineistossa.

Mittausrvirhe aiheutti selkeästi suurimman virheen tuloksiin (taulukot 2–4). Mittaajien tekemä korjaus oli lähes olematon ja sen suunta vaihteli satunnaisesti. Tutkimuksen mukaan mittaajat eivät juurikaan käytä omaa näkemystä määrittäessään lopullisia puustotunnuksia, vaan luottavat mittaamiinsa tuloksiin. Poikkeuksena oli kuvio 10, joka oli puustoltaan hyvin heterogeeninen. Tällä kuviolla mittaajien käyttämä näkemys myös paransi selvästi tulosten pohjapinta-ala arviota. Koealojen sijoittelusta aiheutunut virhe oli myös hyvin pieni. Kuitenkin suuripuustoisilla kuvioilla mittaajat sijoittivat koealat jonkin verran keskimääräistä harvempiin kohtiin ja pienipuustoisilla taas keskimääräistä tiheämpiin (taulukko 3). Kaikkiaan sijoittelusta aiheutuneen virheen merkitys oli kuitenkin vähäinen. Mittausrvirheen suuruus vaihteli kuvioiden puustoisuuden mukana voimakkaasti. Pienipuustoisilla kuvioilla puusto mitattiin keskimäärin oikein. Tarkistusmittauksissa koeala mitattiin sektorikoealana, jos se ei muuten sopinut kokonaan kuviolle. Tutkimuksessa ei selvitetty, olivatko mittaajat mitanneet tällä kohtaa kokonaisen vai sektorikoealan. Osan suuresta mittausrvirheestä voi selittää koealan mittaamisella kokonaisuutena, vaikka se ulottuukin viereiselle kuviolle.

Ilmeisesti pohjapinta-alan kasvaessa puita jää yhä enemmän toistensa taakse, jolloin niitä ei lueta. Tutkimuksen runsaspuustoiset kuviot olivat kaikki kuusikoita. Kuusien oksien ulottuminen rinnankorkeudelle saattoi myös vaikeuttaa pohjapinta-alan mittaamista. Aikaisemmissa tutkimuksissa kuusikoissa on havaittu systemaattista pohjapinta-alan aliarviota (mm. Haara ja Korhonen 2004)

Tutkimuksessa ei kattavasti selvitetty, mitä rela-

skoopikerrointa mitaajat milläkin kuviolla käyttivät. Keskusteluissa kokeen aikana ja sen jälkeen kävi kuitenkin ilmi, että ilmeisesti lähes kaikki käyttivät kokeen aikana ainoastaan kerrointa 1. Aikaisemmissa tutkimuksissa (Mähönen 1984, Laasasenaho ja Päivinen 1986) on havaittu relaskooppikertoimilla 2 ja 4 saatavan samoilta kuvioilta suurempia pohjapinta-alan arvoja kuin kertoimella 1. Mähösen (1984) tutkimuksessa juuri koealan ulottuminen viereiselle kuviolle katsottiin olevan merkittävin aliarvion syy kerrointa 1 käytettäessä. Relaskooppikertoimen 1 käyttäminen myös kuvioilla, joiden pohjapinta-ala oli poikkeuksellisen suuri, voisi selittää osan pohjapinta-alassa tehdystä mittausvirheestä.

Kun tutkimusaineisto jaettiin luokkiin kuvion puuston keskiläpimitan perusteella, voitiin tarkastella läpimitan vaikutusta pohjapinta-alan virheen komponentteihin (taulukko 4). Mittaajien tekemä korjaus ja koealojen sijoittelusta johtuva virhe olivat kaikissa läpimittaluokissa lähes olemattomat. Sen sijaan mittausvirhe kasvoi voimakkaasti keskiläpimitan kasvaessa. Kuvion pohjapinta-ala ja keskiläpimita ovat voimakkaasti korreloituneet. Näiden tekijöiden vaikutusta mittausvirheeseen on tästä syystä vaikea erotella. Tutkimuksen aineistossa pohjapinta-alan mittausvirheen ja kuvion keskiläpimitan yhteys oli jopa selvempi kuin koealan pohjapinta-alan ja mittausvirheen. Tämä antaisi syytä epäillä, että myös kuvion keskiläpimita vaikuttaa pohjapinta-alan mittausvirheeseen.

Jos käytettävä relaskooppikerroin pysyy samana keskiläpimitan kasvaessa, tulevat lukupuut koealalle yhä kauempaa. Suurimmillaan keskiläpimita tutkimusaineistossa oli yli 30 cm, jolloin puut tulivat mukaan koealaan keskimäärin 15 m etäisyydeltä. Kuitenkin suurimmat mitatut läpimitat olivat yli 60 cm. Tällaiset puut tulisi lukea koealaan 1:n kerrointa käytettäessä yli 30 m päästä. Relaskooppikoealat tulisi tällöin sijoittaa vähintään 30 m:n etäisyydelle kuvion rajasta tai käyttää ns. sektorikoealoja. Muussa tapauksessa koeala ei sovi kokonaan tarkasteltavalle kuviolle ja pohjapinta-alasta tulee tästä syystä aliarvio. Kapeilla kuvioilla on mahdollista, että kuvion leveys ei riitä kokonaisen relaskooppikoealan mittaamiseen kerrointa 1 käytettäessä. Etäisyyden mitattavaan puuhun kasvaessa näkyvyys puun runkoon heikkenee. Erityisen voimakkaasti näkyvyys heikkenee kuvioilla, joilla on runsas alikasvos tai

joiden maanpinnan korkeusvaihtelut ovat suuria. Näkyvyyden heikentyessä relaskooppikoealaan kuuluvia puita jää lukematta. Läpimitaltaan suuren puun sattuminen lähelle relaskooppikoealan keskikohtaa estää näkyvyyden suureen osaan koealaa ja saattaa näin kasvattaa pohjapinta-alan mittausvirhettä.

Pohjapinta-alan kokonaisvirheen jakautumista tarkasteltiin myös mitaajittain. Kokonaisvirheen suuruus vaihteli mitaajittain yllättävän paljon. Kaikki kokeeseen osallistuneet mitaajat olivat kuvioittaisen arvioinnin ammattilaisia ja pohjapinta-alan mittaaminen on osa heidän päivittäistä työtutiinaa. Tuloksiin tehty korjaus oli kaikilla mitaajilla vähäinen ja sen suunta vaihteli satunnaisesti. Sijoittelusta aiheutuneessa virheessä mitaajat erosivat toisistaan jonkin verran. Ainoastaan yksi mitaaja sijoitti koealat tutkimuksen runsaspuustoisilla kuviolla keskimääräistä tiheämpiin kohtiin. Suurimmalla osalla sijoittelusta aiheutui lievää aliarviota pohjapinta-alaan. Muutamilla mitaajilla sijoittelun aiheuttama aliarvio oli merkittävä. Mittausvirheessä erot mitaajien välillä olivat selkeitä. Myös mittausvirheen mallissa mitaajien välinen satunnainen vaihtelu tuli merkitseväksi. Mittaajien välillä on pohjapinta-alan määrittämisessä tasoeroja. Vaikka kaikki mitaajat tekivät tutkimusaineistossa keskimäärin aliarvioita pohjapinta-alassa, aliarvion syyt vaihtelivat mitaajien välillä jonkin verran. Mittausvirhe oli kuitenkin selkeästi tärkein pohjapinta-alan harhan aiheuttaja.

5.3 Johtopäätökset

Tärkein pohjapinta-alan harhaan vaikuttava tekijä näyttäisi olevan mitaajien tekemä mittausvirhe. Mittausvirhe kasvoi koealan pohjapinta-alan ja kuvion keskiläpimitan kasvaessa. Pohjapinta-alan harhaa voitaisiin pienentää ja kuvioittaisen arvioinnin tulosten luotettavuutta parantaa käyttämällä kuvioilla, joissa on suuri pohjapinta-ala, suuri keskiläpimita tai näkyvyys on voimakkaan alikasvoksen tai korkeusvaihtelun vuoksi huono, suurempaa relaskooppikerrointa. Tällöin on kuitenkin huolehdittava, että koealoja mitataan riittävästi. Käytettäessä suurempaa kerrointa relaskooppikoealan koko pienenee, jolloin vastaavaan koealojen väliseen hajontaan pääsemiseksi vaaditaan useampia koealoja.

Tutkimuksessa tehtiin mallit pohjapinta-alan kokonaisvirheelle ja mittausvirheelle. Aineiston pienuuden vuoksi saatua malleja ei voida käyttää kuvioittaisella arvioinnilla saatujen puustotietojen korjaamiseen. Vaikka kuvion todellinen pohjapinta-ala ja keskiläpimitta selittävätkin suuren osan pohjapinta-alan virheestä, jää satunnainen vaihtelu edelleen suureksi.

Puuston pohjapinta-alan, tilavuuden ja metsikön toimenpidetarpeen määrittäminen ilmakuvilta onnistuu parhaiten varttuneissa metsissä (mm. Uuttera ym. 2002). Toisaalta juuri näissä metsissä tehdään kuvioittaisessa arvioinnissa suurimmat virheet. Metsäsuunnittelun kustannusten pienentämiseksi voitaisiin varttuneiden metsien puustotiedot ja toimenpidetarpeet määrittää jatkossa ilmakuvilta ilman, että tietojen luotettavuus oleellisesti heikkenee. Maastomittauksissa voitaisiin tällöin keskittyä taimikoihin ja nuoriin metsiin, joiden puustotietojen määrittäminen ilmakuvilta samoin kuin laskennallinen ajantasaistaminen on hankalaa, mutta joiden puustotiedot pystytään maastossa arvioimaan luotettavasti.

Kun puuston kasvua simuloidaan malleilla, joissa lähtötietoina on käytetty virheellisiä puustotietoja, kasvavat alkutietojen virheet simulointikierrosten välillä. Pohjapinta-alan kasvumallien selittävänä muuttujana on mm. puuston pohjapinta-ala. Kun se on mittausvirheen vuoksi aliarvio, antaa malli liian pienen pohjapinta-alan kasvuennusteen ja itseharvenemista ei mallin mukaan tapahdu riittävästi. Liian alhaiset kasvuennusteet siirtävät toimenpideehtotuksia myöhemmäksi ja heikentävät metsänhoidon tasoa. Yhtenä keinona metsäsuunnittelun kustannusten pienentämiseen ollaan nähty metsän kehityksen simulointi yli normaalin 10-vuotisjakson. Jotta simulointijaksoa voidaan kasvattaa, täytyy lähtötietojen olla nykyistä tarkempia.

Kirjallisuus

- Haara, A. & Korhonen, K.T. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- & Korhonen, K.T. 2004. Toimenpide-ehdotusten simulointi laskennallisesti ajantasaistetusta kuvioaineistosta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2004: 157–173.
- Heikkinen, E. 2002. Puustotunnusten maastoarvioinnin luotettavuus ja ajanmenekki. *Metsäsuunnittelun ja ekonomin pro gradu-työ*. Joensuun yliopisto. 52 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curves and volume functions for pine spruce and birch. *Communicationens Institut Forestalis Fenniae* 108.
- & Päävinen R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometriä menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Maa- ja metsätalousministeriö 1999. Kansallinen metsäohjelma 2010. MMM:n julkaisuja 2/1999.
- Moeur, M. & Stage, A.R. 1995. Most Similar Neighbor: an improved sampling inference procedure for natural resource planning. *Forest Science* 41: 337–359.
- Mowrer, H.T. & Frayer, W.E. 1986. Variance propagation in growth and yield projections. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1196–1200.
- Mähönen, M. 1984. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsänarvioimistieteen laudatur-työ*. Helsingin yliopisto.
- Nyyssönen, A., Kilkki, P. & Mikkola, E. 1967. On the precision of some methods of forest inventory. *Acta Forestalia Fennica* 81.
- Oksanen-Peltola, L. 1999. Metsäsuunnittelun lähtökohta. Teoksessa: Heikinheimo, M.(toim.). *Metsäsuunnittelun tietohuolto*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 741: 8–12.
- Pigg, J. 1994. Keskiläpimitan ja puutavaralajijakauman sekä muiden puustotunnusten tarkkuus Metsähallituksen kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsänarvioimistieteen pro gradu-työ*. Helsingin yliopisto. 86 s.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17(4): 313–349.
- Schreuder, H.T., Gregoire, T.G. & Wood, G.B. 1993. *Sampling methods for multiresource forest inventory*. John Wiley & Sons, Inc.
- Ståhl, G. 1992. En studie av kvaliteten i skogliga avdelningsdata som insamlats med subjektiva inventeringsmetoder. *Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för biometri och skogsindelning*. Rapport 24.
- Uuttera, J. ym. 2002. Uudet kuvioittaisen arvioinnin menetelmät – Arvio soveltuvuudesta yksityismaiden metsäsuunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2002: 523–531.
- Ventola, K. 1980. Kuvioittaisen silmävaraisen arvioinnin tarkkuus ja arviointitarkkuuden kehitys arviointikautena. *Metsänarvioimistieteen laudatur-työ*. Helsingin yliopisto. 58 s.

18 viitettä