

Harri Hyppänen, Kari Pasanen ja Jussi Saramäki

Päätelhakkuiden kuviorajojen päivitystarkkuus

Hyppänen, H., Pasanen, K. & Saramäki, J. 1996. Päätelhakkuiden kuviorajojen päivitystarkkuus. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1996(4): 321–335.

Tutkimuksessa selvitettiin satelliittikuvan, ilmakuvan ja satelliittipaikannuksen tarkkuutta päätelhakkuiden kuviorajojen päivityksessä. Lisäksi tutkittiin käytännön päivittämättömän kuvioinnin luotettavuutta hakkuiden jälkeen. Tutkimuksen referenssiaineisto rajattiin orto-oikaistuilta numeerisilta ilmakuvilta. Pinta-alaerojen itseisarvojen keskiarvo oli satelliittikuvarajauksella 16 %, päivittämättömällä kuvioinnilla 22 %, ilmakuvilta päivitetyllä kuvioinnilla 13 % ja satelliittipaikannuksella 4 %. Varttuneen metsän ja päätelhakkuun rajan sijaintiero oli suurinta päivittämättömän kuvioinnin rajoissa (noin 25 m). Vastaava sijaintiero satelliittikuvalta rajattaessa oli noin 15 m ja ilmakuvulta päivitettäessä noin 10 m. Satelliittipaikannuksella (GPS) saatu rajauserosi referenssirajauksesta 5–8 m, mikä on erittäin vähän ottaen huomioon kummankin menetelmän virhelähteet.

Avainsanat: kuvioittainen arviointi, kaukokartoitus, satelliittipaikannus, GPS, toimenpiteiden ajantasaistus

Kirjoittajien yhteystiedot: *Hyppänen & Pasanen*: Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111 80101 Joensuu. *Saramäki*: P.O. Box 1854, Morogoro, Tanzania. Faksi: (Hyppänen) 013-251 4444, sähköposti: harri.hyppanen@forest.joensuu.fi

Hyväksytty 17.10.1996

1 Johdanto

Kuvioittainen arviointi on ollut jo pitkään standardi suomalaisten metsäorganisaatioiden inventointimenetelmänä, jota ovat Suomessa tutkineet esim. Osara (1948), Poso (1983), Mähönen (1984), Suutarla (1984), Laasasenaho ja Päivinen (1986) ja Pussinen (1992). Menetelmässä inventoitava alue jaetaan puusto- ja kasvupaikkaolosuhteiltaan homo-

geeniin metsikkökuvioihin, jotka ovat sekä inventointi- että toimenpideyksiköitä. Käytännössä kuvio on kuviointitarkoituksessa esim. kartalle piirretty sulkeutuvan viivan rajoittama alue (Poso 1983).

Käytännön metsätaloudessa metsikkökuvioiden homogeenisuusvaatimuksesta kuitenkin tingitään, sillä metsänomistajat muodostavat kuviointeja tarkoitustaan vastaavasti (Päivinen 1995). Yksityismetsätaloudessa, jossa inventointialueen ja toimenpiteiden koko on yleensä pieni, on metsikkökuvioin-

ti ollut suurten maanomistajien kuviointia pienipiirteisempää. Inventointiteknisesti suuri kuviokoko ei ole ongelma, pikemminkin päinvastoin, vähentäähän se inventointikustannuksia, mutta keskimääräisen kuviokoon kasvaessa kuvion sisäinen vaihtelu kasvaa (Poso 1983) ja puustotunnusten luotettava silmävarainen arviointi kuviolla vaikeutuu.

Kuvioitaista arviointia koskevat tutkimukset ovat tähän asti keskittyneet arvioitavien metsikkötunnusten tarkkuuteen. Puuston tilavuuden keskivirhe on tutkimusten mukaan 15–30 %. Kuvion rajauksen luotettavuutta on vaikea tutkia kuvioinnin subjektiivisuuden vuoksi (Ojanen 1978). Paikkatietojärjestelmien yleistyessä ja ajantasaisiin kuviotietokantoihin pyrittäessä puustotietojen luotettavuuden ohella on tarkasteltava paikkatietojen virheitä. Koska toimenpidekuvio ei useinkaan vastaa inventointikuviointia, erityistä huomiota on kiinnitettävä toimenpidekuvioiden rajojen päivityksen luotettavuuteen.

Aiemmissä pätehakuiden rajaustarkkuutta käsittelevissä tutkimuksissa on selvitetty Landsat ja SPOT satelliittikuvien tarkkuutta hakkuiden rajaukseen. Hall ym. (1989) ja Hall ym. (1991) mukaan satelliittikuvilta rajaus tuottaa aliarvioita hakkuualueiden pinta-aloista. Olsson ja Sohlberg (1988) saivat 3 % yliarvion SPOT kuvilta rajatuille pätehakkuille. Satelliittipaikannuksen eli GPS:n (*Global Positioning System*) käyttöä kuviorajojen määrittämisessä ovat tutkineet esim. Hellström ja Johansson (1993), Johansson (1993) ja Hämäläinen ja Räsänen (1994).

Tässä tutkimuksessa selvitettiin eri menetelmien tarkkuutta pätehakuiden (avo- ja siemenpuuhakuita) kuviorajojen päivityksessä. Vertailtavina menetelminä olivat rajaus satelliittikuvulta (SAT), numeeriselta orto-oikaistulta ilmakuvulta (REF) ja tavalliselta ilmakuvan paperikopioltä (NALLE2) sekä rajojen määrittäminen satelliittipaikantimella (GPS). Aineistona oli myös päivittämätön kuviointi (NALLE). Jatkossa eri rajauksiin viitataan suluisissa esityksillä lyhenteillä. Numeerisiin ilmakuviin perustuva kuviointi valittiin referenssiksi, koska se arvioitiin tarkimmaksi. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri rajausten pinta-alaerot ja rajaluokittaiset sijaintierot. Rajaluokituksen avulla voitiin ottaa huomioon naapurikuvion vaikutus sijaintieroon.

2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueena oli Metsähallituksen Hyrynsalmen yksikkö. Alueelta oli käytettävissä Landsat TM -satelliittikuva vuodelta 1993, ilmakuvat vuosilta 1994 ja 1995, leimikkosuunnitelmat vuosina 1989–1994 toteutuneista pätehakkuiden sekä päivittämätön kuviointi (NALLE). Metsähallitukselta saatiin myös ilmakuvien paperisuurenoksilta syksyllä 1995 päivitetty kuviointi (NALLE2), joka kattoi osan tutkimusalueesta.

Tutkimuksen pätehakkuualueiden valinnassa pyrittiin mahdollisimman suureen ja eri menetelmien suhteen yhdenmukaiseen aineistoon. Referenssiaineistoksi saatiinkin 13 eri osastolta yhteensä 104 pätehakkuaalaa, joiden maksimivälimatka itä-länsi suunnassa oli 35,7 km ja pohjois-etelä suunnassa 58,6 km. NALLE-kuvioinnin ja referenssikuvioiden pinta-alavertailuun saatiin kuitenkin vain 91 kuviota (keskikoko 5 ha), koska muutamilla pätehakkuaaloilla toteutus erosi poikkeuksellisen paljon alkuperäisestä kuvioinnista. Kuviomäärä pieneni myös siksi, että osa referenssikuvioista yhdistettiin vastamaan NALLE-kuvioita.

Yli puolet referenssiaineistosta näkyi satelliittikuvalla. NALLE2-rajaukset kattivat noin 90 % satelliittikuvalla näkyvistä kohteista. GPS-aineisto puolestaan kattoi noin puolet NALLE2-rajauksista. Yhteenveto aineistoista on taulukossa 1.

SAT-rajaus tehtiin rajaamalla NALLE-aineistosta satelliittikuvan kattamat pätehakkuiden visuaalisesti tietokoneen kuvaruudulta. Koska satelliittikuva oli ilmakuvia aikaisemmalta ajalta, eivät kaikki tehdyt toimenpiteet vielä näkyneet kuvalla. Kuva oikaistiin kartakoordinaatistoon lähimmän naapurin menetelmällä ja 1. asteen yhtälöllä ja maastoresoluutioksi valittiin 20 × 20 m. Satelliittikuvalla

Taulukko 1. Yhteenveto eri rajausmenetelmien aineistoista.

Rajaus	Pinta-alavertailun kuvioiden lukumäärä	Pätehakuiden (REF) keskikoko (ha)	Rajojen (REF) yhteispituus (km)
NALLE	91	5,0	96,8
NALLE2	50	5,5	60,9
SAT	61	6,2	70,6
GPS	22	4,9	28,7

rajattiin yhtenäiset päätehakkuualueet, koska vie-rekkään sijaitsevia alueita ei vaatimattoman maastoerotuskyvyn vuoksi voitu erotella. Satelliittikuvan oikaisun vaikutusta tuloksiin selvitettiin kahden osaston aineistolla (36 päätehakkuuta). Satelliittikuva siirrettiin mahdollisimman tarkasti kohdalleen kiinteistörajojen, GPS-mittausten ja ilmakuvарајаusten perusteella ja päätehakkuiden rajat määritettiin uudelleen.

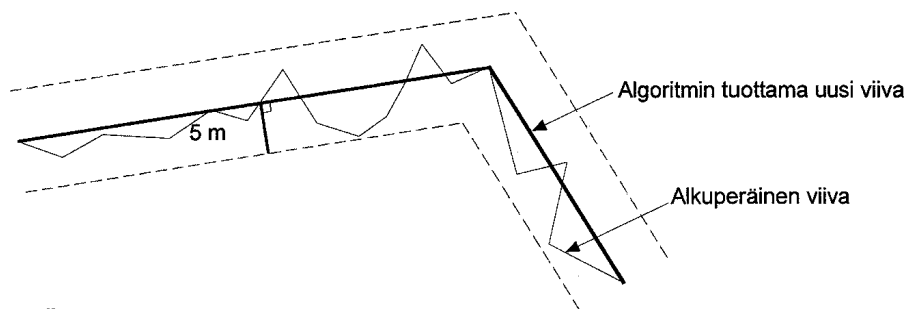
GPS-aineisto mitattiin osalla NALLE-aineiston kuvioista neljänä päivänä syyskuussa 1995. Lisäksi testattiin GPS:n toimivuutta peitteisessä maastossa harventamattoman ja harvennetun varttuneen metsän rajalla. Mittaustarkkuutta tarkasteltiin mittaamalla koordinaateiltaan tunnetun pisteen sijaintia pistemittauksin sekunnin välein sekä mittaus-sarjan keskiarvona. Varsinaista GPS-mittaamisen tekniikkaa ei käydä tässä läpi sillä sitä ovat selvittäneet mm. Leick (1995) ja Holopainen ym. (1996). GPS-mittaukset tehtiin viivamittauksin, jossa paikannuslaite mittaa vakioaikavälein sijainnin ja saaduista pisteistä muodostetaan kuvionraja. Aikavälinä käytettiin yhtä ja viittä sekuntia. Laitteistona oli kuusikanavainen Trimble Pathfinder ProLite, joka oli varustettu differentiaalikorjaussignaalin vastaanottimella. Laitteen paikannustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa 2–3 metriä. Differentiaalikorjaukseen käytettiin Yleisradion lähettämää GPS:n differentiaalikorjausta, joka perustuu Geodeettisen laitoksen kiinteiden vastaanottoasemien avulla laskettuun korjaukseen (Ollikainen ym. 1995). Korjaussignaalin virheeksi ilmoitetaan 2 metriä. Mittausaikana oli suunnitelluista viidestä asemasta käytössä neljä lähimmän aseman ollessa Joensuussa n. 230 km päässä.

GPS:n tuottama kuvionraja on epätasainen, koska yksittäiset havainnot vaeltavat muutaman met-

rin etäisyydellä todellisesta rajasta. Tämän vaihtelun ja toisaalta suuren mittauspisteiden lukumäärän vähentämiseksi GPS-rajaukset käsiteltiin ARC/INFO:n *GENERALIZE*-rutiinilla, joka käyttää Douglas ja Peucker (1973) kehittämää algoritmia (nk. *weeding*-algoritmi). Se korvaa kahden mittauspisteen välisen viivan uudella, mikäli uuden ja vanhan viivan välinen etäisyys ei ylitä annettua maksimietäisyyttä (kuva 1). Tässä tutkimuksessa käytettiin 5 metrin maksimietäisyyttä. Algoritmin haittapuolena on, että sulkeutuvia alueita kuten päätehakkuuta rajattaessa se saattaa hieman pienentää alueiden pinta-aloja.

REF-rajaukset tehtiin satelliittikuvien tapaan kuvaruudulta käyttämällä numeerista ilmakuvaa taustakuvana. Ilmakuvat (13 kpl) olivat vuosina 1994–95 kuvattuja 1:30 000 mittakaavan kuvia. Kuvat digitoitiin negatiiveilta Scanmate 5000 rumpuskannerrilla kuvanlukutarkkuutena 600 pistettä tuumalle. Holopaisen ja Lukkarisen (1994) mukaan kuvanluku negatiiveilta on luotettavampi, koska kuvan sävyarvot voivat muuttua vedostuksen yhteydessä.

Ilmakuva on keskusprojektiio kuvasta alueesta ja kohteiden sijainti kuvalla poikkeaa kartta- eli ortoprojektioista. Myös kameran optiikan virheet sekä maaston korkeusvaihtelut aiheuttavat poikkeamia kohteiden sijaintiin. Ilmakuva muunnetaan ortokuvaksi orto-oikaisulla. Oikaisu on kolmivaiheinen. Ensimmäiseksi määritetään kameran polttovälin ja kuvan reunamerkkien avulla kuvan sisäisen orientointi. Koordinaateiltaan tunnettujen tukipisteiden avulla tehdään kuvan ulkoinen orientointi eli kuvakoordinaatiston muunnos maastokoordinaatistoon. Tässä tutkimuksessa jokaisen osaston alueelle sijoitettiin 6–10 tukipistettä, joiden koordinaatit määritettiin 1:10 000 rekisterikartoilta. Ulkoista orientointia varten oikaisualgoritmillemme voi-



Kuva 1. Weeding-algoritmin toiminta.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetty kuvionrajojen luokitus.

Rajaluokka	Avohakkuu	Siemenpuuhakkuu
Tie	1	21
Ranta	2	22
Sähkölinja	3	23
Tilanraja	4	24
Nuori metsä, kivennäismaa	5	25
Nuori metsä, turvemaa	6	26
Varttunut metsä, kivennäismaa	7	27
Varttunut metsä, turvemaa	8	28
Muu raja	19	39
Epäselvä raja	20	40

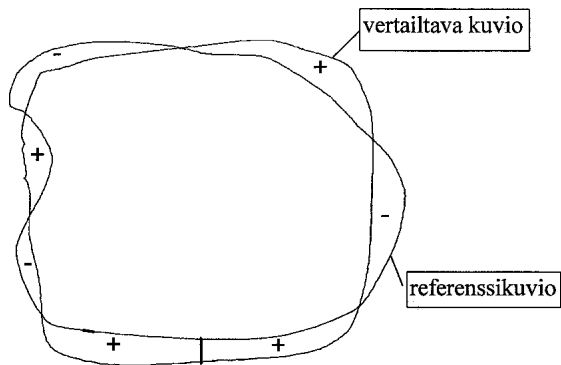
daan antaa myös tiedot kameran sijainnista ja kalistumista kuvanottohetkellä, mutta näitä tunnuksia ei käytetty sillä algoritmi laskee ko. arvoille estimaatit orientointitietojen avulla. Kolmas vaihe orto-oikaisussa on maaston korkeusvaihtelujen eliminointi korkeusmallin avulla. Korkeusmallina käytettiin Maanmittauslaitokselta hankittua 25×25 m pikselikoolla olevaa korkeusmallia. Oikaistun kuvan maastoresoluutioksi valittiin 1×1 m.

Tukipisteistä laskettu oikaisuvirhe oli kaikilla kuvilla alle 5 metriä. Oikaisun onnistuminen tarkastettiin vertaamalla kuvaa numeerisiin kiinteistöelementteihin, joiden sijainti on varsin tarkka. Mikäli kuvilla oli tutkimuksen osastoilla selkeitä sijaintivirheitä, siirrettiin kuvaa paremmin vastamaan kiinteistönrajoja.

Kullekin rajaviivalle määritettiin REF-rajauksen yhteydessä rajaluokka naapurikuvion perusteella (taulukko 2). Oheismateriaalina käytettiin rekisteri- ja kuviokartoja. Rajaluokituksen avulla selvitettiin erilaisten naapurikuvioiden vaikutus rajausvirheeseen. Muu raja-luokkaan kuuluivat lähinnä ei-metsätalousmaan kuviot (esim. avosuot) sekä epäselvien rajojen luokkaan rajat joiden tarkkaa sijaintia ei voitu numeerisilta ilmakuvilta määrittää.

Eri menetelmin rajattujen toimenpidekuvioiden pinta-alojen eroja tarkasteltiin referenssikuviointiin nähden sekä absoluuttisina että suhteellisina pinta-aloina. Pinta-alaerot laskettiin seuraavasti:

$$\text{absoluuttinen ero } e = A_i - A_{ref} \quad (1)$$



Kuva 2. Tutkittavan kuvion ja referenssikuvion leikkaus.

$$\text{suhteellinen ero } e_{rel} = \frac{A_i - A_{ref}}{A_{ref}} \times 100 \quad (2)$$

missä A_{ref} = referenssikuvion pinta-ala

A_i = kuvion pinta-ala vertailtavalla menetelmällä

Pinta-alaeroista laskettiin aritmeettinen keskiarvo ja keskihajonta. Absoluuttisten pinta-alojen erojen tilastollinen merkitsevyys testattiin pareittaisella t-testillä (Ranta ym. 1992). Menetelmässä muodostetaan kuvioittaisista pinta-alaeroista havaintoparit ja lasketaan näiden erotukset d_i ja erotusten keskiarvo \bar{d} . Testisuure on muotoa:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{n}} \quad (3)$$

missä n = havaintojen lukumäärä

s_d = erotuksien keskihajonnan estimaatti

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Kuvioittaisten pinta-aloerojen lisäksi määritettiin erot rajojen sijainnissa. Toisinaan kuvioinnin muoto ja pinta-ala saattavat olla oikeat, mutta kuvion sijainti on väärä. Tämä on tyypillistä satelliittikuville, jossa kuvan oikaisu aiheuttaa sijaintiin virheitä. Sijaintivirheiden ja niistä johtuvien pinta-ala virheiden tutkimiseen on kehitetty useita eri menetelmiä (Bolstad ja Smith 1992, Archibald ja Ahern 1986). Pringle ym. (1989) ovat esittäneet tilastollisia perusteita vektorimuotoisen viivatiedon sijaintivirheiden tarkasteluun.

Tässä tutkimuksessa kehitettiin paikkatieto- eli GIS-operaatioihin (*Geographic Information System*) perustuva tekniikka sijaintivirheen määrittämiseen. Tutkittavasta ja referenssikuvioinnista muodostettiin leikkaukset (kuva 2). Näin saatiin selville kuviointien eroavuudet eli leikkausalueet, jotka jaettiin REF-rajauksen perusteella rajatyyppeihin. Sijaintivirheen suuntaa kuvattiin leikkauskuvion pinta-alan etumerkillä siten, että referenssikuvion sisälle jäävä alue oli pinta-alaltaan negatiivinen ja ulkopuolella positiivinen. Leikkaukset ja viivoittaisten virhelistojen koostaminen ominaisuustiedoista automatisoitiin ARC/INFO:n vektori- ja ominaisuustietorutiineilla. Määrittämällä leikkauskuvioille etumerkit voitiin sijaintivirheiden suunnan systemaattisuutta analysoida. Rajaviivan sijaintivirhe laskettiin jakamalla leikkausten pinta-alojen itseisarvojen summa rajaviivan pituudella. Sijaintivirheistä laskettiin viivan pituudella painotetut keskiarvot ja hajonnat rajaluokittain. Keskiarvo on tulkittavissa rajan sijainnin virheenä rajametriä kohden. Sijaintierojen tarkastelussa siemenpuu- ja avohakkuut yhdistettiin samaan rajaluokkaan, mutta SAT-rajauksen tulokset laskettiin myös erikseen siemenpuu- ja avohakkuille.

4 Tulokset

4.1 Pinta-alaerot

Satelliittikuvarajaus (SAT) johti päättehakkuaalojen 4 %:n systemaattiseen yliarvioon (5 %:n riskitasolla merkitsevä). NALLE-kuvioinnin pinta-alat olivat 2 % (ei merkitsevä riskitasolla 5 %) ja GPS-rajauksen 3 % (merkitsevä jopa 1 %:n riskitasolla) pienempiä kuin vastaavat referenssirajauksen pinta-alat. Ilmakuvilta päivitetyin kuvioinnin (NALLE2) pinta-aloissa ei ollut systemaattista poikkeamaa referenssistä. Pinta-alavertailujen tulokset on koottu taulukkoon 3.

Pinta-alaeroille oli tyypillistä, että kuvion koon kasvaessa suhteellinen ero pieneni (kuva 3). Suhteellisten pinta-alaerojen itseisarvojen keskiarvo oli suurin NALLE-kuvioinnilla (22 %) ja pienin GPS-rajauksella (4 %). SAT-rajauksella suhteelliset pin-

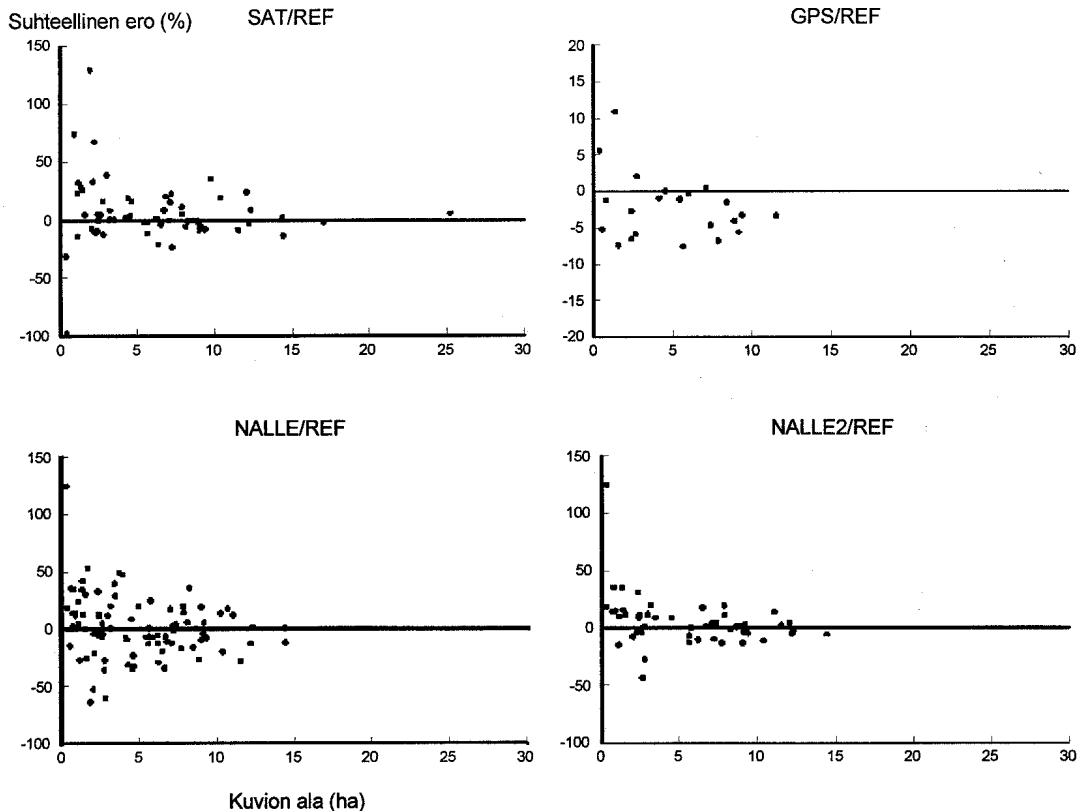
ta-alaerot olivat vain hieman suurempia (16 %) kuin ilmakuvilta päivitetyin NALLE-kuvioinnin (13 %). Yli 5 ha:n kuvioilla vastaavat keskiarvot olivat GPS-rajaukselta lukuunottamatta selvästi pienempiä (SAT-rajauksella 9 %, NALLE-kuvioinnilla 13 %, NALLE2-kuvioinnilla 6 %).

4.2 Rajojen sijaintierot

SAT-rajauksen rajaluokittaiset tulokset on esitetty taulukossa 4 ja virheiden jakautuminen kuvioikoon suhteen kuvassa 4. Tilan rajoja, rantoja ja linjoja ei tarkasteltu havaintojen pienen määrän vuoksi. Vertailumenetelmästä (leikkausoperaatiot) johtuen pienet sijaintivirheet yleensä johtivat lyhyisiin tarkasteltaviin viivoihin. Pisteparvien muodoista onkin nähtävissä, että tarkasteltavan rajaviivan lyhetessä sijaintieron itseisarvo pienenee. Sijaintieron itseisarvon viivan pituudella painotettu keskiarvo oli suurin tieluokassa. Päättehakkuaalan rajoittuessa varttuneeseen metsään sijaintieron itseisarvo oli keskimäärin noin 15 m. Turvemaan nuoren metsän (NMT) ja kivennäismaan varttuneeseen metsän (VMK) tapauksissa siemenpuualan rajauksen virhe oli noin 2 m suurempi kuin avoalan. Absoluuttisten erojen painotetut keskiarvot tieluokkaa lukuun ottamatta olivat hajontoihin nähden pieniä.

NALLE-rajauksessa päättehakkuaalan rajoittuessa kangasmaan tai turvemaan nuoreen metsään (NMT ja NMT) tai kangasmaan varttuneeseen metsään (VMK) sijaintierojen painotettu keskiarvo oli negatiivinen, muissa tapauksissa positiivinen (taulukko 5). Absoluuttiset erot jakautuivat varsin tasaisesti eri suuntiin virheisiin (kuva 5) hajontojen ollessa suuria keskiarvoihin nähden. Varttuneeseen metsän rajaluokissa sijaintierojen itseisarvot olivat huomattavan suuria (keskimäärin noin 25 m). Vastaavissa rajaluokissa saatiin tarkemmat sijaintitiedot jopa satelliittikuvilta. Tilanrajaluokassa sijaintiero oli luonnollisesti pienin. Muissa rajaluokissa kuvioinnin rajojen sijaintitarkkuus oli satelliittikuvarajaukselta tarkempi erojen itseisarvojen painotetun keskiarvon ollessa 9,6–12,5 m.

NALLE2-rajauksessa päättehakkuaalan rajoittuessa turvemaan nuoreen metsään (NMT) tai kangasmaan varttuneeseen metsään (VMK) sijaintierojen painotettu keskiarvo oli negatiivinen, muis-



Kuva 3. Päätehakkualojen suhteelliset pinta-alaerot kuviokoon suhteen eri menetelmillä.

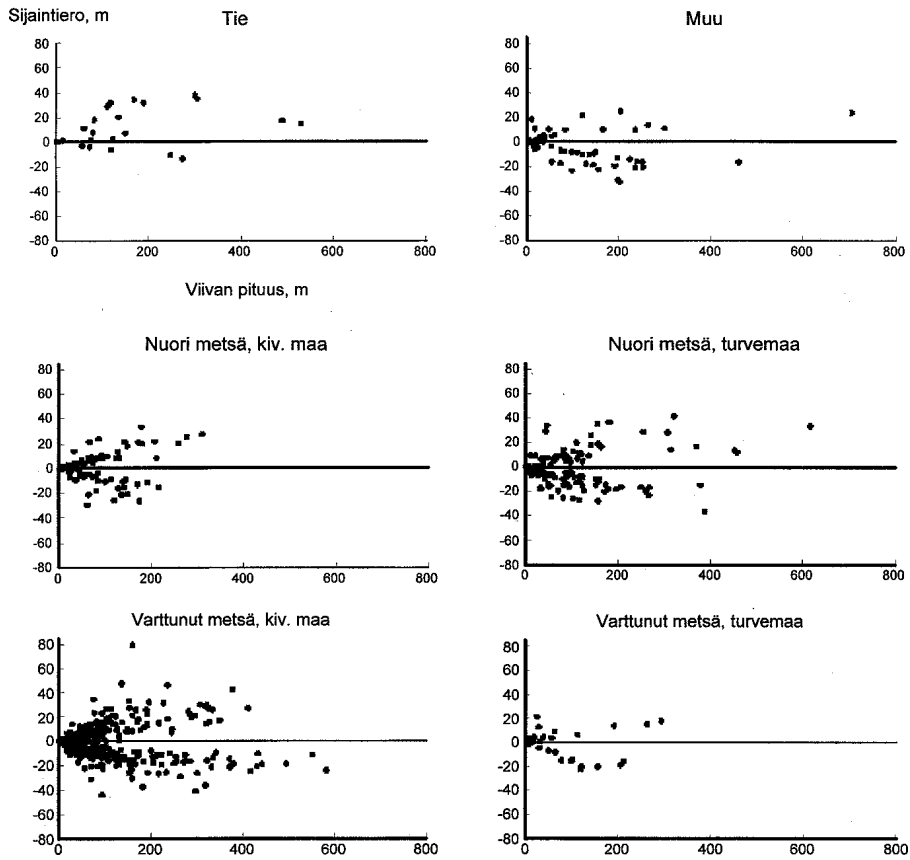
sa tapauksissa positiivinen (taulukko 6). Absoluuttiset erot jakautuivat varsin tasaisesti eri suuntaisiin virheisiin (kuva 6) hajontojen ollessa suuria keskiarvoihin nähden. Sijaintiero oli pienin tilanrajaluokassa. Varttuneen metsän rajaluokassa sijaintierojen itseisarvojen painotettu keskiarvo oli noin 10 m.

GPS-rajauksen sijaintierojen painotetut keskiarvot olivat yleensä negatiivisia, mutta hajontoihin nähden keskiarvojen poikkeamat nolasta olivat pieniä (taulukko 7 ja kuva 7). Tarkastellut viivat olivat varsin lyhyitä ja poikkeamien itseisarvojen viivojen pituuksilla painotetut keskiarvot 4,7–8,3 m.

GPS-laitteen tarkkuusmittauksen tuloksista on havaittavissa (kuva 8) sijainnin vaeltaminen ajan funktiona. Suurin vaihtelu havainnoilla on pohjois-etelä suunnassa (12 m) ja itä-länsi suuntainen vaihtelu (5 m) on paljon vähäisempää.

Taulukko 3. Päätehakkualojen kuvioittaiset pinta-alaerot eri rajausmenetelmillä.

	SAT/REF	NALLE/ REF	NALLE2/ REF	GPS/REF
Absoluuttiset erot (ha)				
Summa	16,68	-8,90	0,67	-3,37
Keskiarvo	0,27	-0,10	0,01	-0,15
Keskihajonta	0,96	1,05	0,61	0,20
Absoluuttisten erojen itseisarvot (ha)				
Keskiarvo	0,67	0,78	0,45	0,18
Keskihajonta	0,74	0,71	0,40	0,17
Suhteelliset erot (%)				
Keskiarvo	8,82	4,15	5,08	-2,21
Keskihajonta	24,80	37,84	22,40	4,43
Suhteellisten erojen itseisarvot (%)				
Keskiarvo	15,71	22,00	13,24	3,95
Keskihajonta	21,05	30,99	18,68	2,90

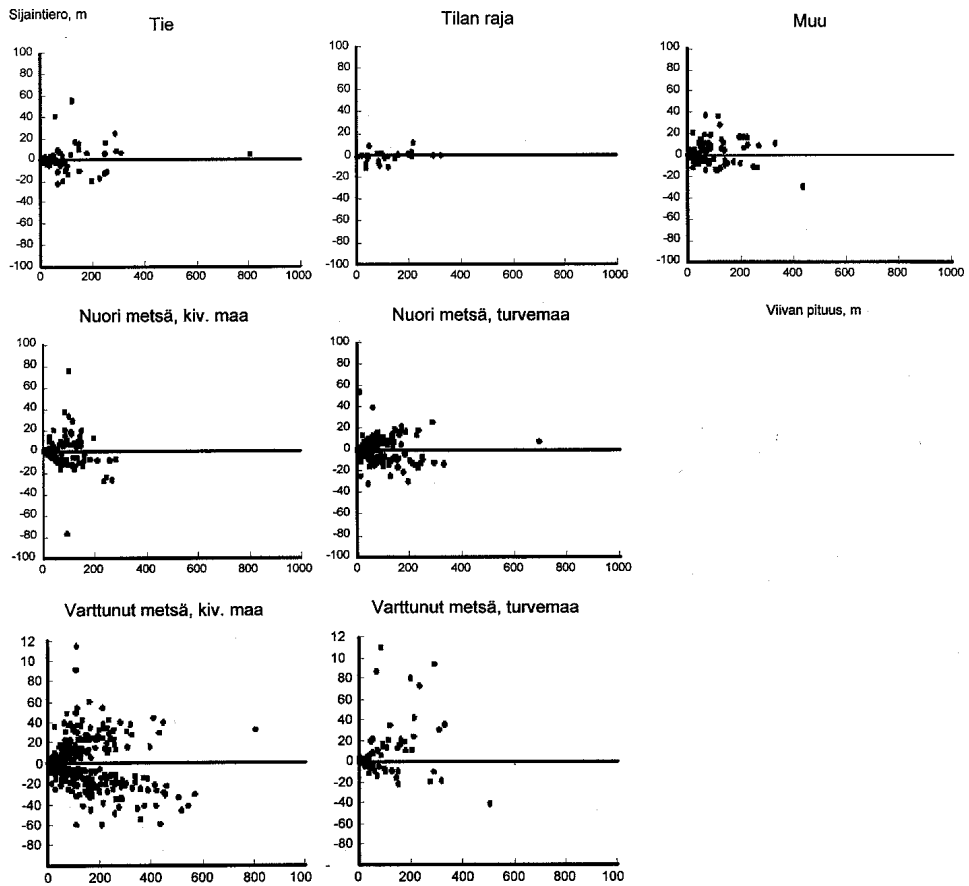


Kuva 4. Satelliittikuvaramituksen absoluuttiset sijaintierot kuviokoon suhteen eri rajaluokissa.

Taulukko 4. Satelliittikuvaramituksen (SAT) rajojen sijaintierot eri rajaluokissa.

	Rajaluokka					
	TIE	NMK	NMT	VMK	VMT	MUU
Viivat						
Lukumäärä	23	78	131	407	31	60
Pituus yhteensä, m	3711	6947	13386	40792	2560	6854
Pituuden keskiarvo, m	161	89	102	100	83	114
Absoluuttiset sijaintierot						
Painotettu keskiarvo, m	15,3	3,3	1,5	-1,7	-2,7	-4,5
Keskihajonta	15,8	13,1	14,7	13,7	11,8	12,7
Sijaintierojen itseisarvot						
Painotettu keskiarvo, m	19,4	14,7	17,0	15,9	14,1	15,7
Keskihajonta, m	12,7	8,4	9,6	9,6	7,5	8,4

NMK = päätähakkuu/kivennäismaan nuori metsä
 NMT = päätähakkuu/turvemaan nuori metsä
 VMK = päätähakkuu/kivennäismaan varttunut metsä
 VMT = päätähakkuu/turvemaan varttunut metsä

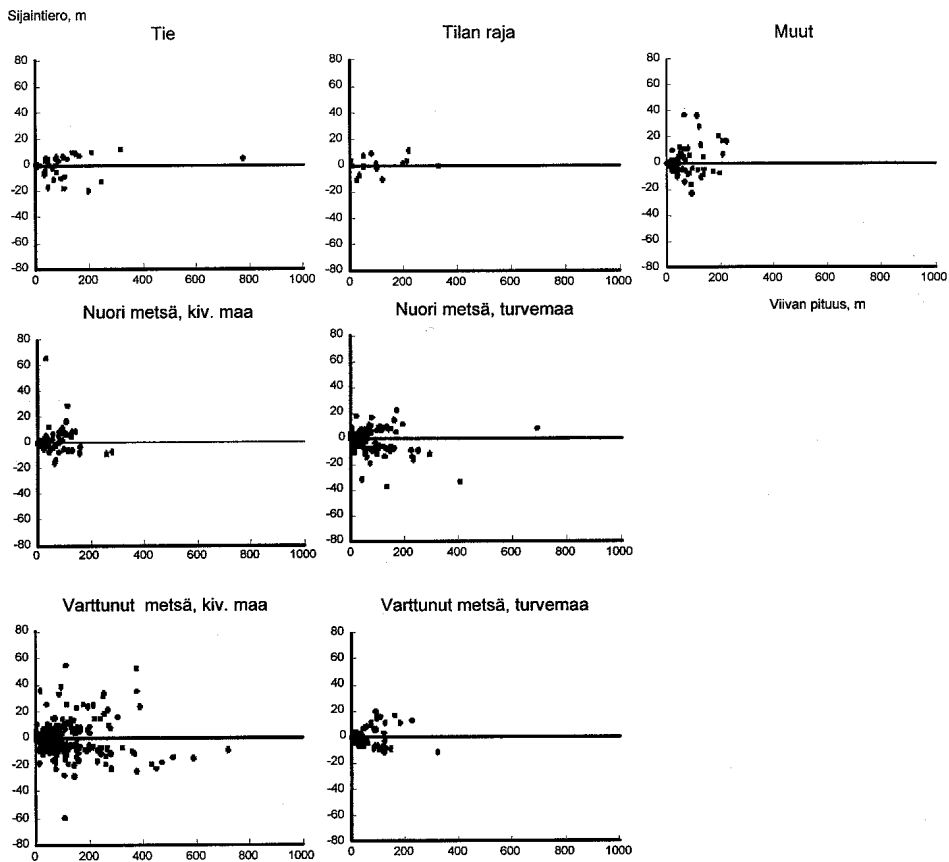


Kuva 5. Maastossa ajantasaistetun kuvionnin rajojen absoluuttiset sijaintierot kuviokoon suhteen eri rajaluokissa.

Taulukko 5. Maastossa ajantasaistetun kuviokartan (NALLE) rajaviivojen sijaintierot eri rajaluokissa.

	TIE	TR	NMK	Rajaluokka NMT	VMK	VMT	MUU
Viivat							
Lukumäärä	73	24	121	253	395	64	132
Pituus yhteensä, m	6743	2927	8315	17265	46200	7306	8030
Pituuden keskiarvo, m	92	122	69	68	117	114	61
Absoluuttiset sijaintierot							
Painotettu keskiarvo, m	2,5	0,1	-1,9	-0,5	-3,6	13,3	1,8
Keskihajonta, m	11,4	5,2	14,1	9,3	20,9	27,7	9,1
Sijaintierojen itseisarvot							
Painotettu keskiarvo, m	9,9	2,9	12,5	9,6	23,4	27,0	10,7
Keskihajonta, m	9,3	4,0	11,6	7,0	15,0	23,4	7,1

NMK = päätehakkuu/kivennäismaan nuori metsä
 NMT = päätehakkuu/turvemaan nuori metsä
 VMK = päätehakkuu/kivennäismaan varttunut metsä
 VMT = päätehakkuu/turvemaan varttunut metsä

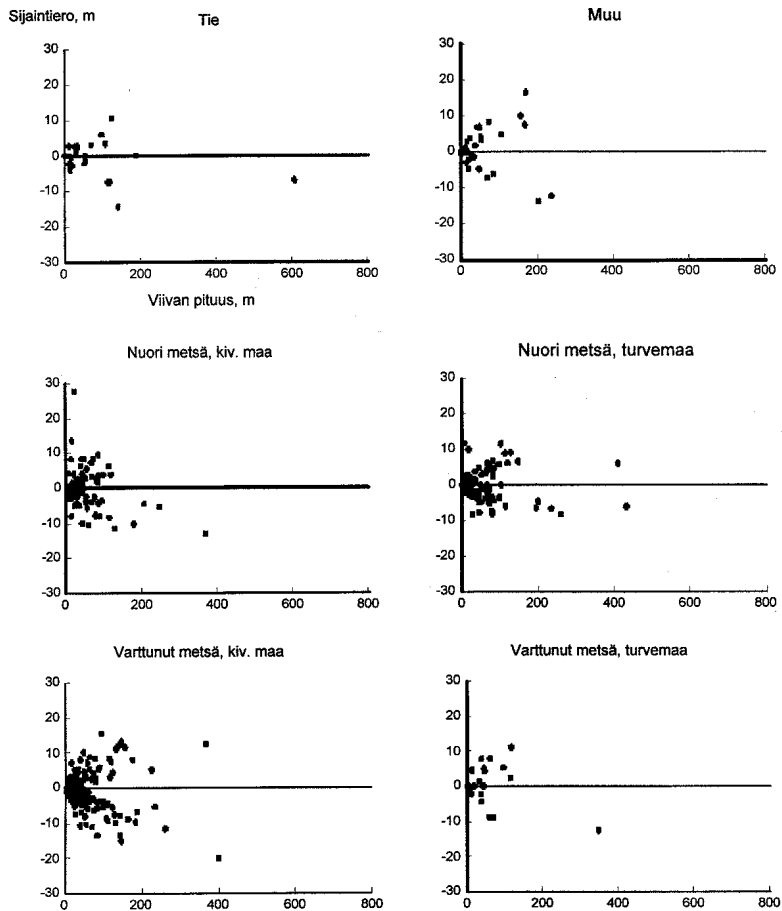


Kuva 6. Ilmakuivilla ajantasaistetun kuvionnin rajojen absoluuttiset sijaintierot kuviokoon suhteen eri rajaluokissa.

Taulukko 6. Ilmakuivilla ajantasaistetun kuviokartan (NALLE2) rajaviivojen sijaintierot eri rajaluokissa.

	TIE	TR	NMK	Rajaluokka NMT	VMK	VMT	MUU
Viivat							
Lukumäärä	37	15	75	160	394	62	78
Pituus yhteensä, m	3670	1577	4143	10295	32628	4080	4531
Pituuden keskiarvo, m	99	105	55	64	76	66	58
Absoluuttiset sijaintierot							
Painotettu keskiarvo, m	1,0	1,7	1,1	-2,5	-1,2	1,2	3,5
Keskihajonta, m	8,0	6,5	9,8	8,0	9,8	7,7	9,8
Sijaintierojen itseisarvot							
Painotettu keskiarvo, m	8,2	4,4	7,1	9,1	11,5	9,0	10,3
Keskihajonta, m	5,2	4,3	8,6	6,0	7,9	5,1	7,7

NMK = päättehakkuu/kivennäismaan nuori metsä
 NMT = päättehakkuu/turvemaa nuori metsä
 VMK = päättehakkuu/kivennäismaan vartunut metsä
 VMT = päättehakkuu/turvemaa vartunut metsä

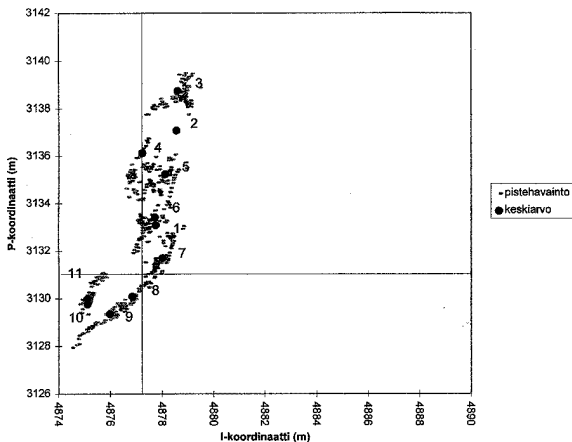


Kuva 7. GPS-rajauksen absoluuttiset sijaintierot kuviokoon suhteen eri rajaluokissa.

Taulukko 7. GPS-rajauksen rajaviivojen sijaintierot eri rajaluokissa.

	TIE	NMK	Rajaluokka			MUU
			NMT	VMK	VMT	
Viivat						
Lukumäärä	32	79	114	272	22	32
Pituus yhteensä, m	2272	4105	6287	12877	1215	1838
Pituuden keskiarvo, m	71	52	55	47	55	57
Absoluuttiset sijaintierot						
Painotettu keskiarvo, m	-2,6	-2,1	-0,3	-1,5	-2,0	0,3
Keskihajonta, m	4,4	6,0	4,1	4,7	5,7	6,1
Sijaintierojen itseisarvot						
Painotettu keskiarvo, m	5,0	5,9	4,7	6,1	7,6	8,3
Keskihajonta, m	3,4	4,3	2,8	3,4	4,0	4,3

NMK = päätehakkuu/kivennäismaan nuori metsä
 NMT = päätehakkuu/turvemaan nuori metsä
 VMK = päätehakkuu/kivennäismaan vartunut metsä
 VMT = päätehakkuu/turvemaan vartunut metsä



Kuva 8. GPS-mittauksen pistehavainnot sijainniltaan tunnetussa paikassa sekä 40 pistehavainnon keskiarvot. Keskiaarvot numeroitu aikajärjestykseen.

5 Tarkastelu

Hall ym. (1989) ja Hall ym. (1991) raportoivat Landsat- ja SPOT-satelliittikuviin perustuvan rajauksen johtavan päättehakkuiden pinta-alojen aliarvioihin. Olsson ja Sohlberg (1988) saivat SPOT-kuvien osalta tulokseksi 3 % yliarvion. Päättehakkuiden ja osin myös harvennusten rajausta on mahdollista myös eri ajankohdilta olevien satelliittikuvien erotuskuvilta (Varjo 1995). Alustavien selvitysten mukaan satelliittikuvirajauksella voidaan päivittää vanhaa kuviointia ja päättehakkualasta saadaan rajattua oikein jopa 85 % (Varjo 1995). Tässä tutkimuksessa Landsat TM -satelliittikuviilta rajatut päättehakkualat olivat merkittävästi suurempia (4,4 %) kuin ilmakuvilta rajatut. Pinta-alojen yliarvioita kertyi päättehakkuiden ja nuorten metsien rajoilla. Osa yliarviosta selittyi tieluokkaan ja epäselviin kuuluneiden rajojen sijaintieroilla, joita ei voitu tarkemmin analysoida. Mahdolliset tied tulivat mukaan päättehakkualaan, koska tiepikseleitä ei voitu erottaa sävyarvojen perusteella päättehakkupikseleistä. Tämä näkyy tieluokan sijaintierojen suurena positiivisena systemaati-

tisena poikkeamana. Suhteellinen pinta-alaero pieni kuvion koon kasvaessa keskiarvon ollessa 15,7 %. Hall ym. (1989) saivat suhteellisten pinta-alo- virheiden itseisarvojen keskiarvoksi 10,5 %, tosin hakkuualojen keskikoko oli miltei kymmenkertainen tähän tutkimukseen verrattuna.

Kuviokoolta ei ole sijaintieroihin vastaavaa vaikutusta kuin pinta-alaeroihin. Hall ym. (1989) saivat sijaintierojen itseisarvojen keskiarvoksi Landsat TM -satelliittikuvien osalta 30,1 m. Tässä tutkimuksessa saadut keskimääräiset sijaintierojen itseisarvot (14–19 m) olivat pienempiä, mutta rajauksessa käytetty tekniikkakin oli tarkempaa. Avohakkuiden rajausta oli hieman tarkempaa kuin siemenpuualojen, johtuen lähinnä kontrastin heikkenemisestä siemenpuualoilla.

Satelliittikuvirajauksen virhelähteitä ovat kuvan oikaisun virhe, suuri pikselikoko, digitoinnin subjektiivisuus ja epäselvästi erottuvat rajan osat. Turvemaiden avohakkuiden rajauksen huomattiin olevan hankalaa, koska avosuot näkyvät samankaltaisina avohakkuiden kanssa. Myös siemenpuuhakuun ja väljennyksen raja, mahdolliset jättöpuut, sekä päättehakuun ja vähäpuustoisen turvemaan raja saattavat aiheuttaa vaikeuksia rajojen määrittämisessä. Suuren pikselikoon aiheuttamat rajapikselit (Kuittinen ja Laaksonen 1993) ja pikselisävyjen voimakas spatiaalinen autokorrelaatio (Campbell 1981, Dana 1982, Congalton 1988) ovat ongelmia rajojen tunnistamisessa. Satelliittikuvien käsittelyssä periaatteena on, että oikaisuvirheen tulisi olla alle yksi pikseli. Oikaisutulle kuvalle on kuitenkin tyypillistä, että kohteiden sijainti on tarkka lähellä oikaisun tukipisteitä, mutta tukipisteiden välille saattaa syntyä alueita, joilla on huomattavakin systemaattisia poikkeamia sijainnissa. Oikaisuvirhe saattaa paikallisesti olla lähes 50 m ja suuri pikselikokokin aiheuttaa helposti yli 10 m sijaintivirheen. Tämä huomattiin tässäkin tutkimuksessa, sillä muutamilla osastoilla oli havaittavissa selkeitä systemaattisia poikkeamia rajauksissa verrattaessa ilmakuvilta tehtyihin rajauksiin.

Satelliittikuvan systemaattisen siirtymän vaikutusta selvitettiin kahden osaston aineistolla (36 kuviota). Satelliittikuva siirrettiin mahdollisimman tarkasti kohdalleen kiinteistörajoiden sekä GPS- ja referenssirajauksen perusteella. Siirretyltä kuvalla tehdyissä rajauksissa sijaintierot olivat huomatta-

vasti SAT-rajasta pienemmät. Turvemaan nuoren metsän ja päätehakkuun rajaluokassa sijaintierojen itseisarvojen painotettu keskiarvo putosi 17,0 m:stä 12,3 m:iin ja kivennäismaan varttuneen metsän tapauksessa 15,9 m:stä 11,4 m:iin.

NALLE-kuvioinnin päätehakkualojen systemaattinen aliarvio johtui lähinnä päätehakkuiden ja kangasmaiden varttuneiden metsien rajojen sijaintivirheistä. Pinta-alaerojen itseisarvojen keskiarvo oli satelliittikuvarajasta noin 6 %-yksikköä suurempi. Sijaintierot päätehakkuiden ja varttuneiden metsien rajoilla olivat kaksinkertaisia muihin rajoihin verrattuna. Päätehakkuiden toteutuksessa oli siis poikettu inventoinnin kuvioinnista joko tietoisesti tai vahingossa. Kivennäismaiden varttuneita metsiä oli hakattu ennakkokuviointia suurempia aloja. Käytännössä varttuneeseen metsään tehtävää leimikon rajausta ja karttakuviota on vaikea saada tarkasti vastaamaan toisiaan. Tulevaisuudessa GPS-mittauksista on odotettavissa helpotusta ongelmaan. Tässä tutkimuksessa tehdyissä testeissä GPS:n toimivuus oli melko hyvä männiköissä, mutta kuusi-valtaisissa metsissä heikohko. Tilanrajojen osalta sijaintivirhe oli alle 3 m ja kertoo lähinnä ilmakuvan oikaisutarkkuudesta, koska kuvio karttojen kiinteistörajat ovat peräisin 1:10 000 rekisterikartoilta ollen siten varsin tarkkoja. Muutamilla (alle 10 % aineistosta) pinta-alavertailuja ei voitu tehdä, koska inventointikuvion ja hakkuun toteutus erosivat poikkeuksellisen suuresti toisistaan. Siten käytännön kuviotietokannan todellinen laatu on hieman NALLE-kuvioinnin tuloksia heikompi.

Koska eri rajausmenetelmien aineistot eivät olleet yhtä suuria, laskettiin NALLE-kuvioinnin tulokset erikseen myös SAT- ja GPS-rajauksen alueilla. SAT-rajasta vastaavalla aineistolla maastossa päivitettyjen NALLE-kuvioinnin tarkkuus oli koko aineistoa hieman parempi. Keskimääräinen suhteellinen pinta-alaero pieneni 22 %:sta 20 %:iin ja rajaluokittaiset sijaintierot olivat 1–2 m pienempiä kuin koko aineistolla. GPS-rajasta vastaavalla aineistolla NALLE-kuvioinnin suhteellisten pinta-alaerojen keskiarvo oli 14 % ja sijaintierot pienenivät kivennäismaan varttuneiden metsien rajaluokkaa lukuunottamatta (kasvoi 3 m) 1–2 m.

Ilmakuvilta päivitetyn NALLE2-kuvioinnin tarkkuus oli varsin hyvä, kun keskimääräiset sijaintierot olivat 10 m:n luokkaa ja suhteelliset pinta-

alaerot keskimäärin 13 %. NALLE2-kuvioinnin virheisiin vaikuttivat ilmakuvavedosten laatu, ennakkokuvioinnin huolellisuus (mm. kynän paksuus) ja erikseen tehtävässä kuvionrajojen piirtämisessä syntyvät virheet sekä rajojen päivityksen huolellisuus. Myös ilmakuvakameran kallistuminen kuvanottohetkellä aiheuttaa virheitä kohteiden sijaintiin. Bolstadin (1992) simulointitutkimusten mukaan taseisen maaston oloissa keskimääräinen sijaintivirhe kuvausmittakaavalla 1 : 30 000 on jo alle 1,4 asteen kallistumalla 10 m ja 1,4–2,8 asteen kulmalla jopa 32 m jos käytetään oikaisemattomia ilmakuvia. Orto-oikaisu huomioi kameran kallistuman.

Numeeriselta orto-oikaistulta ilmakuvasta tehdyn REF-rajauksen luotettavuus riippuu lähinnä kuvaustekniikan ja orto-oikaisun virheistä, mutta inhimilliset huolimattomuusvirheet rajan määrittämisessä ovat myös mahdollisia. Erityisesti puiden varjostamisessa kohdissa rajan tarkkaa sijaintia oli vaikea määrittää. Päätehakkuun ja puuttoman turvemaan rajaus oli monesti hankalaa, vaikeimmissa tapauksissa rajan sijaintia oli pidettävä epäselvänä. Orto-oikaistun ilmakuvan sijainnin virhe riippuu oikaisupisteiden tarkkuudesta, korkeusmallin tarkkuudesta, kamerakulmasta, kameran kallistumisesta ja linssien vääristymistä.

GPS-mittauksissa on havaittavissa rajan sijainnissa ja pinta-aloissa lievää aliarviota. Tähän voi olla syynä se, että rajattaessa päätehakkukuvioita on maastossa kävelty hieman toimenpidekuvion puolella eikä metsän reunassa. Myös käytetty weeding-algoritmi sekä paikannussignaalin monitieheijastus voivat vaikuttaa pinta-aloja pienentävästi. Monitieheijastuksessa paikannussignaali ei tule vastaanottimeen suoraan, vaan heijastuu lähellä olevista kohteista. Ilmiön vaikutus paikannustarkkuuteen voi olla huomattava (Leick 1995).

GPS:n laitteisto toimi uudistushakkualoilla lähes häiriöittä. Laite tarvitsee neljä satelliittia kolmiulotteiseen paikantamiseen ja tämä ehto täyttyi lähes poikkeuksetta mittausaikana syyskuussa 1995. Uudistushakkuilla puusto ei muodostanut estettä satelliittien signaalille, mutta maaston topografia esim. jyrkät rinteet, häiritsivät toisinaan mittauksia. Sen sijaan puuston alla signaalin tulo oli epävarmempaa. Tiheä nuori kuusikko esti tehokkaasti paikannussignaalin saatavuuden. Sellaisina vuorokaudenaikoina, jolloin käyttökelpoisten satelliittien

määrä oli 4–5, ei paikannus kuusikossa tahtonut onnistua. Mikäli satelliitteja oli näkyvillä enemmän, helpottui paikantaminenkin. Varttunut männikkö ei juurikaan häirinnyt paikannusta. Digitaalisella radiosignaalilla tuleva differentiaalikorjaus toimi ongelmitta. Samansuuntaisia tuloksia ovat saaneet Hämäläinen ja Räsänen (1994). Heidän mukaan kasvatusmetsässä kuusikanavaisella laitteella n. 70 % paikannuksista oli kolmeulotteisia eli neljään satelliittiin perustuvia. Hellströmin ja Johanssonin (1993) mukaan paikannus metsäolosuhteissa on tarkkaa, mutta puusto häiritsee toisinaan paikannusta.

Differentiaalikorjauksesta huolimatta GPS-paikannukset eivät lyhyellä aikavälillä jakautuneet satunnaisesti todellisen sijainnin ympärille vaan mitaukset siirtyvät systemaattisesti ajan funktiona. Tällainen mittauksen vaeltaminen differentiaalikorjaamattomissa paikannuksissa johtuu Hellström ja Johansson (1993) ja Shaw (1995) mukaan tahallista sijainnin häirinnästä (SA, *Selective Availability*). Koska paikannuslaite valitsee näkyvillä olevista satelliiteista aina parhaat, tulee mittauksen systemaattiseen siirtymään hyppyjä satelliitteja vaihdettaessa, sillä tahallinen häirintä on erilaista eri satelliiteille (Shaw 1995). Tässä saatujen tulosten perusteella differentiaalikorjauskaan ei poista kaikkea systemaattista paikannusten vaeltamista.

Määritettäessä GPS:llä pinta-aloja on virhe Hellström ja Johansson (1993) mukaan riippuvainen alueen koosta, mittauspisteiden lukumäärästä ja paikannusvirheestä koordinaatistossa. Esimerkiksi yhden hehtaarin alueella, jonka rajat määritetään 25 pisteellä, on pinta-alavirhe n. 4 % eli 0,04 ha. Pinta-alan virhe kuitenkin pienenee alueen ja mittauspisteiden määrän funktiona. 500 pisteellä mitattuna yhden hehtaarin alan pinta-alavirhe on alle 1 %. Tässä tutkimuksessa käytettiin viivamittauksissa kahta aikaväliä. Yhden sekunnin intervallilla mittauspisteitä kertyy hakkuualalta tuhansia ja viiden sekunnin väleinkin satoja. Tiheällä mittauksella poikkeavien havaintojen kontrollointi helpottuu, mutta laitteistolta vaaditaan paljon tallennuskapasiteettia. Paikannusvirhettä arvioitiin mittaamalla sijainniltaan tunnetun pisteen koordinaatteja. Mittauksen keskiarvo poikkeaa pohjoiseen kolme metriä todellisesta sijainnista. Havaintojen keskijononta oli kolme metriä pohjois-etelä suunnassa ja 1,3

metriä itä-länsi suunnassa ja vaihteluväli oli p-e suunnassa 12 metriä ja i-l suunnassa 5 metriä. Rajausmittauksissa ilmeni huomattavasti suurempia yksittäisiä poikkeamia.

Erot ilmakeu- ja GPS-rajauksessa kertovat vain menetelmien tuottamien rajojen poikkeavuudesta. Molempien rajausmenetelmien virhelähteet sekä kahtena mittauspäivänä ilmenneen GPS-mittauksen systemaattisen siirtymän huomioon ottaen sijainnin poikkeamia voidaan pitää pieninä. Itse asiassa on vaikeaa sanoa, kumpi rajaus on oikeampi, tosin GPS-mittaukset sisältävät paljon pienvaihtelua. Hellström ja Johansson (1993) mittasivat mitatasivat 4,1 ha päättehakkua 17 toistolla ja saivat keskimääräiseksi pinta-alavirheeksi 0 % niin jatkuvalla kuin pistemittauksellakin. Pinta-alavirheiden itseisarvojen keskiarvoksi Hellström ja Johansson (1993) saivat jatkuvalla mittauksella 1,7 % ja pistemittauksella 3,1 %. Sijainnin poikkeamien itseisarvojen painotetut keskiarvot (4–8 m) olivat luonnollisesti suurempia kuin kontrollimittauksen keskimääräinen sijaintivirhe. Johanssonin (1993) mukaan GPS:n tarkkuus pistemittauksessa on 2–5 m, mutta liikkuen mitattaessa noin 10 m.

Rajojen manuaalisen digitoinnin sijasta ainakin satelliittikuvarajauksessa olisi voitu testata erilaisia segmentointialgoritmeja (Johansson 1994) tai reunantunnistusmenetelmiä (Drewniok 1994). Tässä tutkimuksessa päädyttiin visuaaliseen tarkasteluun perustuvaan manuaaliseen digitointiin. Rajojen sijaintierojen määrittely GIS:llä tuotettujen vertailtavien rajausten leikkausalojen avulla osoittautui käytökelpoiseksi ja nopeaksi menetelmäksi. Virhealojen paloitteleminen tarkasteltaville rajanosille tosin vaati digitoinnissa erityistä huolellisuutta ja aikaa virheellisten havaintojen välttämiseksi. Käytetty rajaluokitus oli varsin karkea, mutta palveli tämän tutkimuksen tarpeita hyvin ja tärkeimpiin luokkiin kertyi aineistoa riittävästi.

Metsävaratietojen jatkuvassa ajantasaistuksessa kuviorajojen päivitykseen on syytä kiinnittää huomiota, koska vanha kuviointi muuttuu etenkin päättehakkuiden ja varttuneiden metsien rajojen osalta. Rajojen päivitys ilman kaukokuva- tai GPS-havaintoja on erittäin virhealtista. Vaikka pinta-alavirheet kumoavatkin toisiaan suuralueilla, niiden merkitys virhelähteenä taktisessa ja operatiivisessa suunnittelussa puustotietojen virheiden ohella tulisi voida

arvioida. Näin perusteltu valinta eri päivitysmenetelmien välillä olisi mahdollista. Kuviorajojen luotettavuusvaatimukseen ja päivitysmenetelmän valinta on kytköksissä myös puustotietojen päivitysmenetelmiin ja luotettavuusvaatimuksiin. Rajojen päivitysmenetelmän valinta riippuu myös siitä, millä aikajänteellä tiedot on päivitettävä. Päätehakkuiden ja varttuneiden metsien rajojen suhteen päivityksellä ei liene kiirettä, koska varttuneet välimet-sät saanevat odottaa hakkuupäätöksiä varsin pitkään.

Satelliittikuvien käyttö rajojen päivitykseen yhdessä GPS-mittausten kanssa voi olla vartenotettava vaihtoehto, silloin kun ilmakuvien hankintaan ei ole muuta tarvetta. GPS:n avulla voidaan päivittää kaikki metsäautotiet (Johansson ja Gunnarsson 1994) ja tarvittaessa myös toimenpiteiden rajoja. Kuvioinnin päivitys voidaan perustaa myös pelkästään GPS:n käyttöön ja toteuttaa maastotyöt vähitellen muun toiminnan yhteydessä. Teiden ja kiinteistörajojen numeerisen sijaintitiedon avulla satelliittikuvien suurilta systemaattisilta siirtymiltä voidaan välttyä. Harvennuskuvioiden rajojen päivitys voidaan tehdä tiheitä kuusikoita lukuunottamatta GPS-mittauksin. Mikäli satelliittikuvia käytetään ajantasaistuksen tarkistuksessa ja ohjauksessa, on niiden hyödyntäminen rajojen päivityksessäkin kustannussyistä perustellumpaa. Satelliittikuvien tarkkuutta voidaan lisätä myös käyttämällä Landsat TM -kuvan sijasta tarkempia satelliittikuvia. Näkyvissä on jo tällä vuosikymmenellä saada 1–5 metrin erotuskyvyn omaavia satelliittikuvia, esimerkkeinä SPOT-4- ja EarthWatch-satelliitit (Kramer 1994). Aluksi kuvat tulevat olemaan kuitenkin pankromaattisia.

Orto-oikaistuilta digitaalisilta ilmakuvilta rajojen päivityksen tarkkuus on satelliittikuvia selkeästi parempi. Osa rajoista on kuitenkin satelliittikuvien tavoitin epäselviä ja harvennusten erotuminen heikkoa, joten GPS-rajauksellekin on tarvetta. Ilmakuvia ei myöskään tarvita teiden päivitykseen, koska GPS:n avulla saadaan laajojen alueiden tiestön sijaintitiedot ajantasalle. Ilmakuvien käyttö rajojen päivityksessä on perusteltua, jos satelliittikuvien erotuskyky katsotaan riittämättömäksi tai ilmakuvulle on muutakin käyttöä kuin pelkkä rajojen päivitys. Satelliittikuvilla kuvausajankohdat ovat kiinteät ja toisinaan pilvettömien kuvien

saanti on hankalaa. Kuvat ovat myös hyvin laajalaisia ja hukkapinta-aloilta ei voida välttyä. Lennotonekuvauksissa kuvausajankohta voidaan valita ja kuvaus on täsmäkuvausta eli lennot kohdennetaan halutuille alueille. Toisaalta hinta pinta-alayksikköä kohden on satelliittikuvia huomattavasti kalliimpi. Trendi metsäntutkimuksessa onkin kehittää numeeristen ilmakuvien, videokuvien ja spektrometrikuvien menetelmiä metsävarojen inventointiin, hahmon- ja muutosten tunnistamiseen, metsäluonnon monimuotoisuuden arviointiin sekä metsien terveydentilan seurantaan.

Jatkotutkimuksissa tulisi kehittää GPS:n ja numeeristen kaukokuvien yhteiskäyttöä kuviorajojen ajantasaistuksessa. Eri ajankohdilta olevien erotuskuvien lisäksi pitäisi tutkia geometriselta erotuskyvyltään tarkempien satelliittikuvien käyttömahdollisuuksia. Kuviorajojen sijaintitietojen luotettavuus myös muiden kuin toteutuneiden päätehakkuiden osalta tulisi selvittää yhtenä inventointitietojen epävarmuustekijänä.

Kiitokset

Tutkimus on toteutettu Joensuun ja Helsingin yliopistojen, Metsäntutkimuslaitoksen ja Metsähallituksen yhteistutkimushankkeessa 'Inventorying, monitoring and updating forest information for forest management planning', jonka rahoittajana on Maa- ja metsätalousministeriö. Maastoaineiston tutkimuksen käyttöön on luovuttanut Metsähallituksen Hyrynsalmen yksikkö. Yksikkö on myös tehnyt tutkimusalueilla tarkistusmittauksia. Tekijät haluavatkin kiittää MH Asko Saatsia, MH Arto Tolosta ja Mti Tapio Alakiuttua Metsähallituksesta kaikesta avusta tutkimuksen läpiviemiseksi. GPS-laitteen tutkimuksen käyttöön antoi Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitos. Käsikirjoitukseen ovat MMT Annika Kangas, MMT Simo Poso, MML Jari Varjo ja MMM Eero Lukkarinen esittäneet useita hyödyllisiä kommentteja ja parannusehdotuksia.

Kirjallisuus

- Archibald, P. D. & Ahern, F. J. 1985. A Statistical analysis of forest harvest depletion mapping accuracy using Landsat MSS data. Proceedings of the 19th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan, 21.–25. October 1985. s. 697–709.
- Bolstad, P. V. 1992. Geometric errors in natural resource GIS data: Tilt and terrain effects in aerial photographs. *Forest Science*. 38(2): 367–380.
- & Smith, J. L. 1992. Errors in GIS. Assessing spatial data accuracy. *Journal of Forestry*. November 1992.
- Campbell, J. B. 1981. Spatial correlation effects upon accuracy of supervised classification of land cover. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 47(3): 355–363.
- Congalton, R. G. 1988. Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 54(5): 587–592.
- Dana, R. W. 1982. Background reflectance effects in Landsat data. *Applied Optics*. 21(22): 4106–4111.
- Douglas, H. D. & Peucker, T. K. 1973. Algorithms for the reduction of the number of points required to to represent a digitized line or its caricature. *Canadian Cartographer*. 10(2).
- Drewniok, C. Multi-spectral edge detection. Some experiments on data from Landsat-TM. *International Journal of Remote Sensing*. 15(18): 3743–3765.
- Hall, R. J., Kruger, A. R., J. Scheffer, J., Titus, S. J. & Moore, W. C. 1989. A statistical evaluation of Landsat TM and MSS data for mapping forest cutovers. *Forestry Chronicle*. December 1989: 441–449.
- , Dams R. V. & Lyseng L. N. 1991. Forest cut-over mapping from SPOT satellite data. *International Journal of Remote Sensing*. 12(11): 2193–2204.
- Hellström, C. & Johansson, S. 1993. Exakta positioner och arealer med GPS. *SkogForsk Resultat*. 13/1993.
- Holopainen, M. & Lukkarinen E. 1994. Digitaalisten ilmakuvien käyttö metsävarojen inventoinnissa. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 4. 33 s.
- , Hyppänen, H. & Pasanen, K. 1995. GPS-paikannus ja metsäsovellukset. *Metsänhoitaja*. 2/1996: 23–26.
- Hämäläinen, J. & Räsänen, T. 1994. GPS-paikannus metsäolosuhteissa. *Metsätehon katsaus* 5/1994.
- Johansson, S. 1993. GPS i återväxtplaneringen. *SkogForsk Resultat*. 6/1993.
- & Gunnarsson, P. 1994. GPS och GIS för inventering och åjourhållning av vägnätet. *SkogForsk Resultat*. 2/1994.
- Johnsson, K. 1994. Segment based land-use classification from SPOT satellite data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 60(1): 47–53.
- Kramer, H. J. 1994. Observation of the earth and its environment, survey of missions and sensors. Springer-Verlag. 580 s.
- Kuittinen, R. & Laaksonen, J. 1993. The effect of the spatial resolution of the satellite image on the object interpretation accuracy. Reports of the Finnish Geodetic Institute. 93(4): 1–37.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkastamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Leick, A. 1995. GPS satellite surveying. Wiley, New-York. 560 s.
- Mähönen, M. 1984. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 56 s.
- Ojanen, M. 1978. Kuvioarajojen luotettavuus uudentyyppisessä kuvioittaisen arvioinnin menetelmässä. *Metsänarvioimistieteen laudatur-työ*. Helsingin yliopisto.
- Ollikainen, M., Poutanen, M. & Koivula, H. 1995. Suomen kiinteiden GPS-asemien verkko. *Maanmittaus* 70(1): 21–40.
- Olsson, H. & Sohlberg, S. 1988. Interaktiv hyggeskartering med digitala SPOT data. *Moniste*.
- Osara, N. A. 1948. Maatilmetsälön taloussuunnitelma. *Keskusmetsäseura Tapio*, Helsinki. 69 s.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica*, 17(4): 313–349.
- Prisley, S. P., Gregoire, T. G. & Smith, J. L. 1989. The mean and variance of area estimates computed in an arc-node geographic information system. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 55(11): 1601–1612.
- Pussinen, A. 1992. Ilmakuvat ja Landsat TM -satelliittikuva välialueiden kuvioittaisessa arvioinnissa. Pro gradu -työ. Joensuun yliopisto. 48 s.
- Päivinen, R. 1995. Kuvioittaisesta arvioinnista ei kannata luopua vähään aikaan. *Folia Forestalia* 1995(1): 70–72.
- Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1992. Biometria, tilastotiedettä ekologeille. *Yliopistopaino*. 569 s.
- Shaw, S. G. 1995. Target corrected GPS point features for accurate results. *GIS-World*. May 1995: 56–60.
- Suutarla, I. 1984. Kuvioittaisen inventoinnin päivitys ja sen luotettavuus. Pro gradu -työ. Helsingin yliopisto, metsänarvioimistieteen laitos. 47 s.
- Varjo, J. 1995. Controlling continuously updated forest data by satellite remote sensing. *Käsikirjoitus. International Journal of Remote Sensing*, 17(1): 43–67.