



■ Harri Hyppänen

Harri Hyppänen

## Eriaikaiset ilmakuvat metsäkuvioiden muutosten tunnistamisessa

**Hyppänen, H.** 1999. Eriaikaiset ilmakuvat metsäkuvioiden muutosten tunnistamisessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/1999: 155–166.

Tutkimuksessa on esitetty menetelmä erotuskuvatekniikan soveltamisesta numeerisille ilmakuville sekä testattu menetelmän luotettavuus metsässä tapahtuneiden muutosten tunnistamiseksi. Kuviokartan ja erotuskuvan avulla tulkittiin muuttuneet kuviot ja tulkinnan tuloksia verrattiin maastossa kartoitettuihin muutoksiin. Tulosten mukaan menetelmällä on luotettavasti tulkittavissa esimerkiksi maanmuokkaukset ja päätehakkuut. Lievemmat muutokset, kuten harvennukset, eivät menetelmällä erottuneet.

Asiasanat: numeeriset ilmakuvat, muutostunnistus, kuvankäsittely, paikkatietojärjestelmä, kuvioittainen arviointi

Yhteystiedot: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Metsäliitto, Etelä-Suomen hankinta-alue, PL 10, 02020 Metsä

Puhelin: 01046 22015, sähköposti: harri.hyppanen@metsaliitto.fi

Hyväksytty 27.1.1999

## 1 Johdanto

Metsäsuunnittelun tietojen keruu on Suomessa perinteisesti toteutettu toistamalla silmävarainen kuvioittainen arviointi metsäalueella määrävällein. Tällainen 'sykli-inventointi' on tehty samalla alueella yleensä 10–20 vuoden välein. Määrävällein tehtävään inventointiin perustuvalla menetelmällä on useita heikkouksia. Järjestelmän puustovaratieidot ovat ajantasalla vain inventointihetkellä, jos myöhemmin tehtyjä hakkuita ja metsänhoitotoimen-

piteitä ei päivitetä kuviotietoihin. Edelleen inventoinnissa rajattu metsäkuvio ja hakkuun rajaus eivät yleensä vastaa toisiaan ja kuviointi muuttuu huomattavasti inventointikierron aikana. Lisäksi luonnontuhojen vaikutukset metsävaroihin huomioidaan usein vasta inventoitaessa sama alue uudelleen. Historiatietoa ei juurikaan hyödynnetä ja paljon maastotyötä vaativana inventointi on myös kallis. Lisäksi yksityismetsissä metsäsuunnittelu on kohdennettu koko suunnittelualueelle eli myös niille tiloille, jotka eivät suunnitelmaa ole tilanneet.

Useat metsätalouden organisaatiot ovat siirtymässä ajantasaisiin tietojärjestelmiin, joissa mitattuja puustovaratietoja kasvatetaan malleilla ja muutokset päivitetään kuviotietoihin. Ajantasallapidolle ongelman aiheuttaa lainmuutos, jonka mukaan yksityismetsänomistaja ilmoittaa metsänkäyttöilmoituksilla ainoastaan aikomansa hakkuut, ei toteutuneita. Toisaalta tietojen ajantasaisuuden tarve on kasvanut erityisesti ympäristökysymysten ja nopeutuneen puunhankinnan myötä. Yksityismetsätaloudessa on tarvetta menetelmille, jotka helpottavat kuviotietojen ajantasalla pitoa samalla minimoiden kalliit maastomittaukset.

Historiatietoa ja kaukokuvia hyödyntävä paikkatietosovellus, joka kohdentaa mittaukset muuttuneille alueille, tarjoaa välineet edellä esitetyn ongelman ratkaisuun. Kuvassa 1 on esitetty kaavio päivitysmenetelmästä, jossa hyödynnetään kaukohavainnointia muutosten ajantasaistamisessa.

Metsävaratietojen päivittäminen ei ole ongelmallista. Virhelähteitä ovat sekä sijaintitietojen että ominaisuustietojen virheet. Ensimmäisestä on esimerkkinä kuviorajojen muutoksista ja virheellisistä rajauksista johtuvat pinta-alavirheet, jälkimmäisestä mittaus- ja mallivirheet. Myös eri virheiden yhteisvaikutus on todennäköistä. Mallivirheitä on selvittänyt Kangas (1996, 1997) ja päivityksessä syntyviä pinta-alavirheitä Hyppänen ym. (1996).

Kaukokartoitusmenetelmät ovat edullinen tapa tunnistaa metsässä alueet, joilla muutoksia on tapahtunut. Kaukokuvien käytön edellytyksenä on, että puustossa tapahtunut muutos aiheuttaa havaittavissa olevan muutoksen myös latvuston ominais-säteilyssä. Lisäksi on otettava huomioon erilaiset ilmakehän olosuhteet, kosteusolot, auringon valon suunta- ja korkeuskulma sekä sensorin ja kohteen väliset kulmat eri kuvanottohetkillä (Singh 1989), jotka saattavat häiritä muutosten tunnistamista. Varjon (1993, 1995, 1996) satelliittikuvilla tekemät tutkimukset osoittavat, että moniaikaisten kuvien tulkinta on käyttökelpoinen menetelmä muutosten tunnistamiseen. Hänen mukaan Landsat TM -kuvilta on luotettavasti tunnistettavissa avohakkuut sekä kohtuullisen suuret tuhot, lisäksi moniaikaisilta kuvilta ovat tunnistettavissa myös harvennukset ja metsänhoitotyöt kohtuullisella tarkkuudella. Satelliittikuvien avulla tutkimuksissa voitiin pienentää maastoinventointien määrää 10–30 %:iin metsäalu-

een pinta-alasta kymmenen vuoden aikajaksolla. Häme (1991) ja Gopal ja Woodcock (1996) ovat selvittäneet moniaikaisen kuvatulkinnan käyttömahdollisuuksia myös metsän terveydentilan seurantaan.

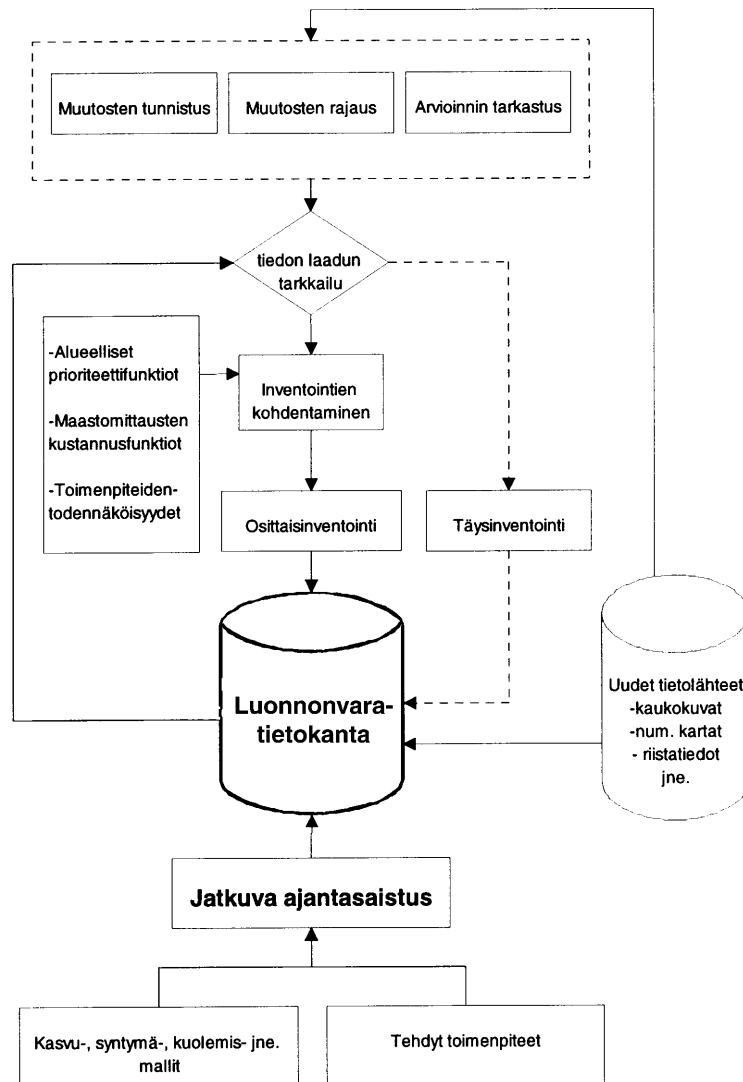
Satelliittikuvilla saadut lupaavat kokemukset herättävät mielenkiinnon tarkempien kuvatuotteiden mahdollisuuksiin metsäsuunnittelussa. Eri omistajaryhmien metsät ovat Suomessa usein pirstoutuneina pieniin ja erillisiin alueisiin, jolloin satelliittikuvien hankintakustannukset pinta-alayksikköä kohden muodostuvat suuremmiksi kuin pelkkä kuvien kattavuus antaisi olettaa. Ilmakuvia on perinteisesti käytetty metsätaloudessa ennakkokuviointiin, mutta numeerisen kuvankäsittelyn ja paikkatietojärjestelmien kehityksen myötä mielenkiinto ilmakuvatulkinnan lisäämiseksi metsätaloudessa on jatkuvasti kasvamassa. Tästä ovat osoituksena viimeaikaiset numeerisia ilmakuvia koskevat tutkimukset (Holopainen 1992, Holopainen ja Lukkari-nen 1994, Roimela 1994, Holopainen 1995, Hyppänen 1996, Hyppänen ym. 1996). Ilmakuvatulkinnan myötä monet satelliittikuvatulkinnan ongelmat saavat ratkaisun, mutta ilmakuvatulkinta tuo myös eteen uusia ongelmia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää satelliittikuvilla hyviä tuloksia tuottaneen moniaikaisen kuvatulkinnan käyttökelpoisuutta numeerisille ilmakuville, kehittää menetelmä moniaikaisten ilmakuvien kalibrointiin ja testata menetelmän luotettavuutta.

## 2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueena oli Suonteen suunnittelualueen lohkot 1 ja 3 Suonenjoen kunnassa, Pohjois-Savon Metsäkeskuksen alueelta (kuva 2). Suonteen alueen pinta-alatiedot on esitetty taulukossa 1.

Suonteen alueen vanha metsätaloussuunnitelma ja sen tiedot olivat vuodelta 1985. Kesällä 1996 alueelle tehtiin uusi suunnitelma, jolloin maastotöiden yhteydessä inventoitiin myös alueella ilmakuvauksajankohtien (1995 ja 1996) välisenä aikana tapahtuneet muutokset, kuten hakkuut, maanpinnan käsittelyt ja metsätuhot. Kaikkiaan kuvioita, joilla oli tehty hakkuuta tai metsänhoitotoimenpiteitä löytyi 20 kappaletta, mutta yhtään metsätuhokuvioita ei havaittu. Vuoden 1985 kuviokartan alueella muu-



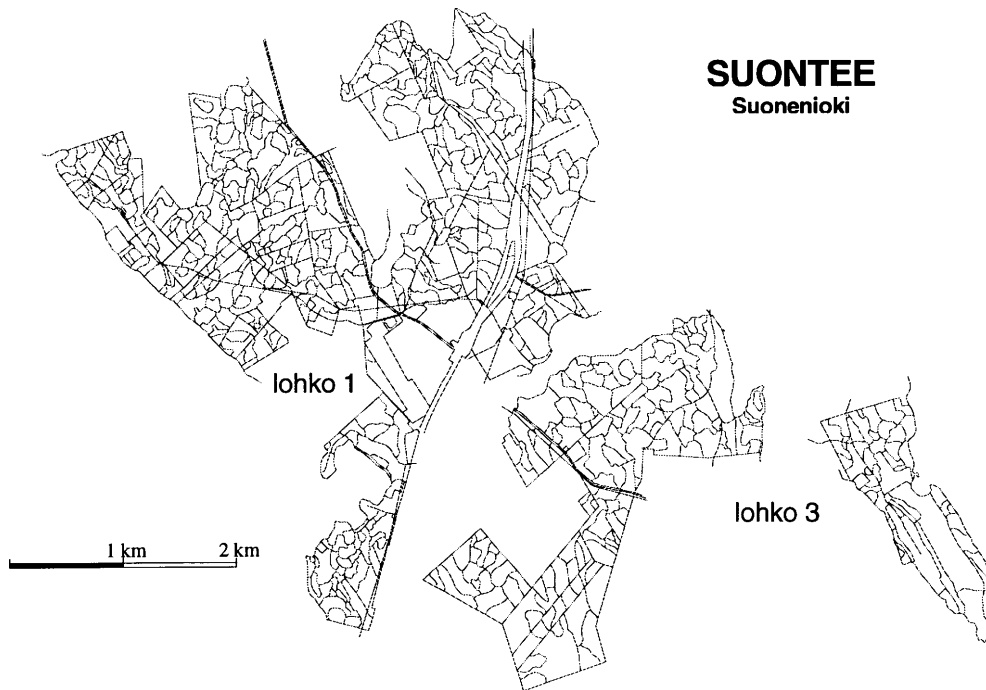
**Kuva 1.** Kaaviokuva kaukokuvia hyödyntävästä inventointi- ja kontrollimenetelmästä, jossa eri tietolähteet yhdistetään paikkatietojärjestelmän avulla (Pasanen ja Hyppänen 1995).

toskuvia oli 15. Taulukossa 2 on esitetty tiedot muutuskuvioista.

Suonteen alueella oli tehty ilmakuvauus vuonna 1995 kuvausmittakaavassa 1:20 000 ja kesällä 1996 alue kuvattiin uudelleen samassa mittakaavassa. Ilmakuvien negatiivit skannattiin ja numeeriset kuvat orto-oikaistiin FM-Kartta Oy:ssä. Alueelta oli käytettävissä ilmakuvia 8 kpl vuodelta 1995 ja 18 kpl vuodelta 1996. Ilmakuvat oikaistiin kolmen

metrin pikselikokoon, mikä on Hyppäsen (1996) mukaan sopiva ilmakuvan pikselikoko metsävarojen numeeriseen tulkintaan. Kuvien oikaisun keski- virhe vaihteli 4 ja 7 metrin välillä.

Erotuskuvatekniikka perustuu kahden tai useamman ajankohdan kuvien tulkintaan. Tekniikka on alunperin kehitetty satelliittikuvien tulkintaan. Menetelmän periaatteena on tarkastella kahden eri ajankohdan kuvien välisiä erotusarvoja. Useimmiten



Kuva 2. Suonteen 1985-kuviokartta lohkoista 1 ja 3.

vanhemman ajankohdan kuva kalibroidaan radiometrisesti vertailukelpoiseksi uudemman kuvan kanssa. Kun asetetaan vanha kuviokartta paikkatietojärjestelmän avulla erotuskuvan päälle, voidaan muuttuneet metsäkuviot tunnistaa ja rajata muuttuneet kuvionrajat digitoimalla. Vertaamalla tunnistettuja muutosalueita kuviotietoihin saadaan selville kuviot, joilla päivitys on jäänyt tekemättä tai epäonnistunut. Tämän jälkeen maastomittaukset voidaan tarvittaessa kohdentaa näille alueille.

Moniaikaisessa kuvatulkinnassa avainasemassa kuvien oikaisun lisäksi on kuvien onnistunut kalibrointi. Ilmakuvien kalibrointi on monitahoinen ongelma, joka voidaan jakaa kolmeen osavaiheeseen:

1. kuvan sisäinen sävyarvojen korjaus,
2. saman ajankohdan vierekkäisten kuvien kalibrointi sekä
3. eri ajankohtien kuvien kalibrointi

Ilmakuvan keskusprojektiivisuudesta johtuva kohteiden säteissiirtymä ja sen aiheuttamat auringon

Taulukko 1. Suonenjoen Suonteen alueen pinta-alat ja kuvioiden lukumäärä vuonna 1985.

Lohko	Pinta-ala, ha	Kuvioiden lukumäärä	Kuvion keskikoko, ha
Lohko 1	809	501	1,6
Lohko 3	546	283	1,9

Taulukko 2. Suonteen alueen muutoskuviot

Muutosluokka	Kuvioiden lukumäärä	Kuvioiden yhteenlaskettu pinta-ala (ha)
Puustonkäsittelyt		
ylispuiden poisto	1	0,8
ensiharvennus	3	4,8
harvennus	2	2,5
avohakkuu	5	6,2
Maanpinnan käsittelyt		
laikutus	4	4,9

myötä- ja vastavalon alueet aiheuttavat sävyarvojen voimakasta vaihtelua kuvan sisällä (Holopainen ja Lukkarinen 1994). Sävyarvot voivat vaihdella ilmakuvan eri osissa voimakkaasti maasto-olosuhteiltaan samanlaisilla kohteilla. Metsäkuvioiden rajaamisessa tämä ei ole suuri ongelma, sillä kokenut tulkitsija pystyy kompensoimaan ilmiön vaikutuksia. Numeeriselle kuvankäsittelylle sävyarvojen vaihtelu aiheuttaa kuitenkin ongelmia.

Toinen kalibroinnin vaihe on vierekkäisten, saman ajankohdan kuvien kalibrointi. Yksittäinen ilmakuva kattaa suhteellisen suppean alueen, jolloin laaja-alaiseen tulkintaan kuten kokonaiselle suunnittelualueelle tarvitaan paljon kuvia. Vierekkäiset ilmakuvat eivät ole kuitenkaan suoraan vertailukelpoisia keskenään. Kuvien sävyarvot poikkeavat toisistaan, johtuen esimerkiksi vaihteluista kuvaushetken valaistusoloissa, filmimateriaalissa ja kuvien kehityksessä.

Kolmannessa vaiheessa kalibroidaan saman alueen eri ajankohtien väliset ilmakuvat. Eri vuosien ilmakuvissa on valaistusolojen, filmimateriaalin ja kehityksen lisäksi eroja ilmakehän ominaisuuksissa sekä metsän kasvusta, tuhoista ja ihmisen toimenpiteistä johtuvia poikkeamia.

Aiemmissä tutkimuksissa esitetyt tekniikat ilmakuvan sisäiseen sävyarvojen korjaukseen perustuvat joko regressiomallinnukseen mm. kuvakoordinaattien avulla (Holopainen 1992) tai kuvan lohkomiseen homogeenisempiin sävyarvolohkoihin (Holopainen ja Lukkarinen 1994, Holopainen 1995).

Tässä tutkimuksessa sovellettiin kuvamuunnoksia kuvan sisäiseen sävyarvojen korjaukseen (Singh 1989). Ilmakuvilla samankaltaisten kohteiden sävyarvot vaihtelevat riippuen kohteen sijainnista kuvalla. Kuvatulkinnan perustaksi otetaan kanavasuhdeet alkuperäisten RGB-kanavien (*Red*, *Green*, *Blue*) sijasta. Menetelmässä oletetaan, että sävyarvojen muuttuminen kuvan eri osissa on samankaltaista eri aallonpituuskanavilla, jolloin valoisuuden vaihtelu kuvan eri osissa ei vaikuta niin voimakkaasti aallonpituuskanavien välisiin suhteisiin. Satelliittikuvatulkinnassa kanavasuhdeita on käytetty runsaasti ja erilaisia muunnoksia on kehitetty luonnonvarojen seurantaan paljon. Tässä tutkimuksessa käytettiin seuraavia muunnoksia:

1. *infrapunan ja punaisen valon suhde (IR/R)*. Lasketaan jakamalla numeerisen kuvan punainen kanava vihreällä kanavalla:  $\frac{R}{G}$
2. *infrapunan ja vihreän valon suhde (IR/G)*. Lasketaan jakamalla numeerisen kuvan punainen kanava sinisellä kanavalla:  $\frac{R}{B}$
3. *punaisen ja vihreän valon suhde (R/G)*. Lasketaan jakamalla numeerisen kuvan vihreä kanava sinisellä kanavalla:  $\frac{G}{B}$
4. *NDVI-kasvillisuusindeksi (Normalized Difference Vegetation Index) ((IR - R)/(IR + R))*. Lasketaan jakamalla numeerisen kuvan punaisen ja vihreän kanavan erotus kanavien summalla:  $\frac{R - G}{R + G}$
5. *IHS-muunnoksen H-kanava (Intensity, Hue, Saturation)*. H-kanava kertoo pikselin värisävyn asteina välillä 0–360. Lasketaan seuraavasti:

$$r = \frac{M - R}{M - m}$$

$$g = \frac{M - G}{M - m}$$

$$b = \frac{M - B}{M - m}$$

missä

$r$ ,  $g$ ,  $b$  saavat arvot väliltä 0–1,

$M$  = suurin arvo kanavista R,G ja B sekä

$m$  = pienin arvo kanavista R,G ja B

H-kanavan (Hue) arvot saadaan seuraavasti:

Jos  $M = m$ , niin  $H = 0$ ;

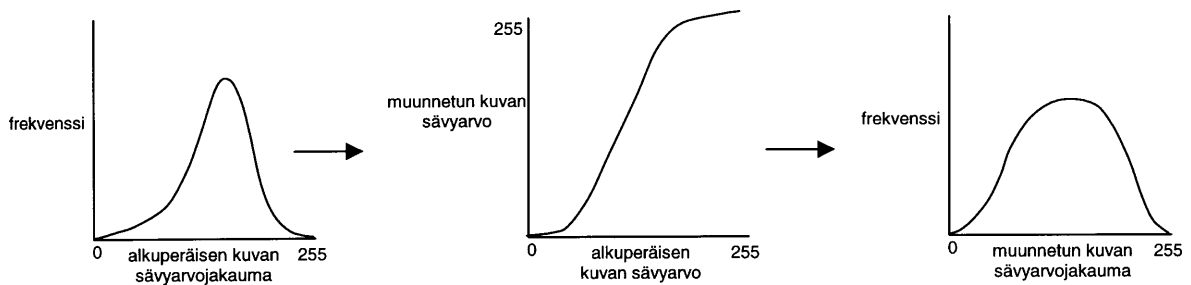
Jos  $M = R$ , niin  $H = 60 (2 + b - g)$ ,

Jos  $M = G$ , niin  $H = 60 (4 + r - b)$ ,

Jos  $M = B$ , niin  $H = 60 (6 + g - r)$

Laskennan jälkeen kaikille muunnoksille annettiin sama paino skaalaamalla sävyarvojakaumat välille 0–255.

Toinen vaihe kalibroinnissa oli saman ajankohdan vierekkäisten kuvien kalibrointi. Laaja-alaista tulkintaa varten ilmakuvista muodostetaan kuvamosaiikki. Ilmakuvilla jokainen kohde näkyy ainakin kahdella tai jopa kuudella eri kuvalla stereopeiton ansiosta. Tätä vierekkäisten kuvien peittoa hyödynnetään kuvamosaiikin muodostamisessa. Kuvien yhteisten alueiden avulla vierekkäisten kuvien sävyarvot kalibroidaan vastaamaan toisiaan. Näin



**Kuva 3.** Histogrammien sovittaminen. Alkuperäisen kuvan sävyarvohistogrammi muunnetaan muunnos- eli LUT-taulun avulla halutun muotoiseksi.

kuvamosaiikissa ei synny kuvien välille tasoeroja, jotka häiritsisivät muutosten tulkintaa.

Koska ilmakuvienv erotuskyky heikkenee kuvan reunoille mentäessä, leikattiin kuvien reunoista 5–10 % kuvanleveydestä pois. Jokaiselle kuvalle jätettiin kuitenkin riittävästi stereopeiton aluetta kalibrointia varten. Menettely poistaa myös suurimmat säteissiirtymän alueet sekä vähentää myötä- ja vastavalon alueista aiheutuvia virheitä.

Vierekkäisten kuvien välillä olevat erot voidaan korjata joko yksinkertaisella tasokorjauksella, regressioanalyysillä tai sävyarvohistogrammien sovittamisella (nk. *histogram matching* -tekniikka). Tässä tutkimuksessa käytettiin jälkimmäistä tekniikkaa, jolla saadaan sävyarvohistogrammit kuvien välillä vastaamaan paremmin toisiaan. Menetelmä perustuu sävyarvojen muunnostauluihin (*Look Up Table, LUT*), joiden avulla vierekkäisten kuvien sävyarvohistogrammit muokataan. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 3. Molempien kuvausvuosien kuvista yksi valittiin mosaiikin pohjakuvaksi, jonka sävyarvojakaumaan muut kuvat kalibroitiin. Mikäli kuvalla ei ollut stereopeittoa pohjakuvan kanssa, kalibroitiin tällainen kuva sellaisen (jo kalibroidun) naapurikuvan kanssa, jolla oli stereopeittoa pohjakuvan kanssa.

Kolmas vaihe kuvien kalibroinnissa oli eri ajankohtien kuvamosaiikkien kalibrointi. Satelliittikuvilla on saatu lupaavia kokemuksia robustista lineaarisesta regressioanalyysistä (Olsson 1994, Varjo 1993 ja 1995). Menetelmässä laaditaan regressiomallit kalibrointiaineistosta ja saaduilla malleilla kalibroidaan vanhempi kuvamosaiikeista vertailukelpoiseksi uudemman kanssa tai päinvastoin. Reg-

ressiokalibroinnin heikkoutena on tuotettujen mallien kuvauskohtaisuus, joten ne on muodostettava jokaista kalibrointikertaa varten erikseen.

Regressiomallinnuksen kalibrointiaineisto muodostetaan sellaisista kohteista, joissa ei oletettavasti ole tapahtunut olennaisia muutoksia kuvausajankohtien välillä (Olsson 1994). Kohteet voidaan valita niiden käsittelyhistorian perusteella. Kalibroinnilla poistetaan esimerkiksi ilmakehän aiheuttamat sävyarvojen muutokset ja muut kuvien väliset erot. Menetelmä on herkkä kuvien sijaintivirheille, joten kalibrointimallia ei ole järkevää tehdä yksittäisten pikselien sävyarvojen perusteella (Olsson 1994).

Tässä tutkimuksessa aineiston muuttumattomista kuvioista valittiin satunnaisesti sata kalibrointikuvioita. Kuvioille sijoitettiin 20 metrin säteinen ympyrä ja ympyrän alalle sattuneiden pikselien sävyarvoista laskettiin keskiarvo. Regressiomallit muodostettiin näiden keskiarvojen perusteella.

Regressiomalleina käytettiin kanavittaisia yhden selittävän muuttujan malleja. Lasketuilla malleilla varsinainen kuvien kalibrointi tehtiin pikseleittäin. Käytetty robusti regressioanalyysi poikkeaa tavallisesta regressioanalyysistä siten, että malliin voimakkaasti vaikuttavat poikkeavat havainnot jätetään aineistosta pois. Mikäli kalibrointiaineistossa on ”kelvottomia” havaintoja, esim. pilven tai avohakkuun vuoksi, ne poistetaan automaattisesti aineistosta. Tässä tutkimuksessa kalibrointiaineistosta poistettiin kaikki havainnot, joiden jäännösvirhe oli suurempi kuin kaksi kertaa mallin keskivirhe. Regressiomallien yleinen muoto on esitetty kaavassa 1.

$$kuva96_i = a + b \times kuva95_i + \varepsilon \quad (1)$$

missä:

$kuva96_i$  = vuoden 1996 kuvamosaiikin kanavasuhde  $i$ ,

$kuva95_i$  = vuoden 1995 kuvamosaiikin kanavasuhde  $i$ ,

$a$  = mallin vakio sekä

$b$  = mallin kerroin

$\varepsilon$  = mallin virhe

Erotuskuvat muodostettiin kuvien kalibroinnin jälkeen vähentämällä vuoden 1996 kuvamosaiikista 1995 kuvamosaiikki. Sävyarvojen erotukset voivat olla joko positiivisia tai negatiivisia. Tässä tapauksessa muutoksen suunnalla eli erotuksen etumerkillä ei ollut suurta merkitystä, koska eri muutostyyppäjä ei eroteltu joten erotuskuvista laskettiin niiden itseisarvot. Tämän jälkeen saadut itseisarvot skaalattiin välille 0–255 kuvien tulkinnan helpottamiseksi. Erotuskuvalla muuttuneet alueet näkyvät suurina erotusarvoina eli sävyiltään kirkkaina verrattuna sävyiltään tummempisiin muuttumattomiin alueisiin. Eri vaihtoehtojen vertailun perusteella visuaalisessa tulkinnassa päädyttiin käyttämään RGB-värikombinaatiota, jossa punaisen värin (R) muodostaa kanavasuhteen IR/R erotus, vihreän värin (G) kanavasuhteen IR/G erotus ja sinisen värin (B) kanavasuhteen NDVI erotus. Valitulla kanavamunuksilla muuttumattomat kuviot näkyvät vihertävänä ja selkeät muutokset erottuvat purppuran värinä.

Paikkatietojärjestelmän avulla asetettiin tulkittavan alueen vanha kuviokartta erotuskuvan kanssa päällekkäin ja muutoskuvioiden tulkinta tehtiin visuaalisena tulkintana. Työaseman näyttöpäätteeltä valittiin hiirellä digitoimalla kaikki muutoskuviot, eli kuviot joiden sävyt erotuskuvalla poikkesivat selkeästi ympäröivien kuvioiden sävyistä. Tulkitsija oli kaukokartoituksen asiantuntija, mutta ei ollut tutustunut maastossa tulkittavaan alueeseen ennen tulkintaa. Ennen tulkintaa valittiin visuaalisesti alkuperäisiltä kivilta varsinaisen tutkimusalueen ulkopuolelta muuttuneita alueita, kuten avohakkuita, teitä ja maanmuokkausaloja. Näiden alueiden avulla säädettiin erotuskuvan värisävyt näytöllä niin, että muuttuneet alat erottuivat mahdollisimman hyvin. Tulkittuja potentiaalisten muutoskuvioiden karttoja verrattiin maastoinventoinnilla kartoitettuihin todellisiin muutoskuvioiden. Esitettyihin tuloksiin on

laskettu kuvatulkinna perusteella saatu muutosalueiden kokonaispinta-ala ja todellinen inventoitu muutosala, sekä kuvatulkinna avulla löytyneiden todellisten muutoskuvioiden suhteellinen osuus kuvatulkinna muutoskuvioista.

### 3 Tulokset

Kuvassa 4 on esitetty eri kuvausajankohtien kanavasuhteiden väliset riippuvuudet ennen regressiokalibrointia. Mitä selkeämpi ja suoraviivaisempi on eri ajankohtien kanavasuhteiden välinen positiivinen riippuvuus, sitä paremmat mahdollisuudet lineaarisella regressiokalibroinnilla on toimia luotettavasti.

Kuvista on nähtävissä, että ainoastaan kanavasuhteella R/G on selkeä positiivinen riippuvuus ja kanavasuhteella IR/G heikko positiivinen riippuvuus eri kuvausajankohtien välillä. Muilta kanavasuhteilta riippuvuutta ei juurikaan löydy.

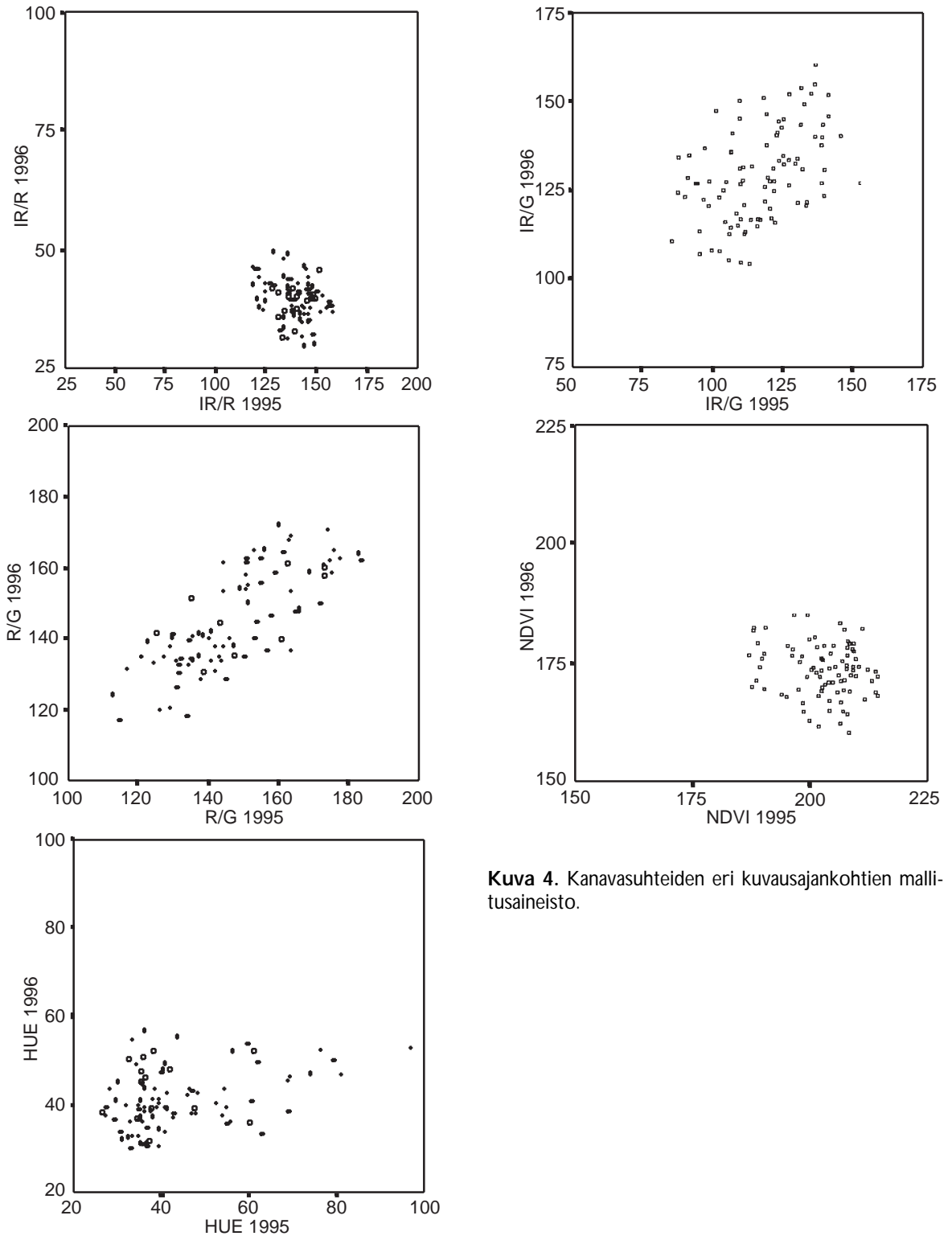
Kuvakalibrointia varten muodostettiin regressiomallit. Mallien tulokset on koottu taulukkoon 3.

Kalibroinnin luotettavuus on arvioitu regressiomallien ominaisuuksien perusteella. Mallin selitysaste on tunnusluku, joka kertoo mallin selittämän osuuden aineiston kokonaisvaihtelusta ja se saa arvoja väliltä 0–1. Kanavasuhteella R/G on selkeästi muita kanavasuhteita parempi selitysaste. Mallien alhaisista selitysasteista huolimatta niitä käytettiin eri ajankohdan kuvien kalibrointiin.

Kuvien tulkinnassa muuttuneita kuviota löytyi lohkolta 1 yhteensä 36 kuviota (75 ha) ja lohkolta 3 seitsemän kuviota (19 ha). Maastoinventoinnilla

**Taulukko 3.** Kalibrointimallien luotettavuutta kuvaavat tunnusluvut ja mallien parametrit.

Kanavasuhde	Mallin selitysaste, R <sup>2</sup>	Vakion $a$ arvo	Kertoimen $b$ arvo	Havaintojen lkm
IR/R	0,061	54,693	-0,107	89
IR/G	0,297	85,545	0,377	73
R/G	0,578	54,34	0,615	87
NDVI	0,023	206,11	-0,162	94
HUE	0,124	33,95	0,168	92



**Kuva 4.** Kanvasuhteiden eri kuvausajankohtien mallitusaineisto.



**Taulukko 4.** Erotuskuvatulkinnan tulokset.

Muutosluokka	Lukumäärä	Tulkinnalla tunnistetut	Pinta-ala
<b>Puustonkäsittelyt</b>			
ylispuiden poisto	1	1	0,8
avohakkuu	5	5	6,2
ensiharvennus	3	0	4,8
harvennus	2	0	2,5
<b>Maanpinnan käsittelyt</b>			
laikutus	4	4	4,9

saatuja muutoskuvioita oli loholla 1 yhteensä 13 kappaletta (16,6 ha) ja loholla 3 kaksi kappaletta (2,6 ha).

Taulukossa 4 esitetään erotuskuvatulkinnan muutosluokittaiset tulokset.

## 4 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa kehitettiin menetelmä erotuskuvatekniikan soveltamisesta numeerisille ilmakuville sekä testattiin menetelmän soveltuvuus metsäsuunnittelun apuvälineenä. Erotuskuvilta tulkittiin metsässä kuvausajankohtien välillä tapahtuneet muutokset sekä verrattiin tulkintaa maastotarkastuksen tuloksiin. Tehty tutkimus osoittaa, että esitetty menetelmä on jatkokehityksen arvoinen, mutta ei vielä valmis työväline kuviotietojen päivitykseen ja kuviotietokannan ylläpitoon. Erityisesti harvennusten tulkinnan luotettavuuden lisäämiseen tulee panostaa jatkokehityksessä.

Tässä tutkimuksessa käytetty aineisto oli paras käytettävissä ollut aineisto tutkimuksen tarpeisiin, mutta se ei ollut riittävän laaja. Muuttuneita kuvioita tutkimusalueella oli 20 kappaletta ja kuvausajankohtien väli oli vain yksi vuosi. Tästä johtuen tutkimuksen tuloksia tulee pitää suuntaa-antavina. Menetelmän jatkokehityksessä tulisikin panostaa suuremman ja kattavamman aineiston keruuseen sekä pidemmän ilmakuvausten välisen ajan vaikutusten tarkasteluun. Näin voitaisiin myös paremmin arvioida menetelmän luotettavuus ja käyttökelpoisuus käytännön metsäsuunnittelussa.

Tuloksista nähdään, että menetelmällä on tunnistettavissa metsässä tapahtuneet voimakkaat muutokset. Avohakkuut, maanpinnan käsittelyt sekä ylispuiden poisto tunnistettiin erotuskuvulta. Sen sijaan harvennukset eivät erottuneet eli yhtään harvennusta ei tulkinnassa löytynyt. Harvennukset tehdään useimmiten alaharvennuksina, jolloin poistettavat puut ovat pienimpiä puita. Tästä syystä alaharvennuksen aiheuttama muutos metsikön latvuston rakenteessa on suhteellisen pieni. Tämä on todennäköisesti yksi syy harvennusten tulkinnan epäonnistumiseen. Toinen mahdollinen syy on eri ajankohdan kuvien väliset sijaintierot. Sijaintierot voidaan jakaa oikaisusta johtuviin poikkeamiin ja kuvien nadiiripisteiden eroavuudesta johtuviin poikkeamiin. Vaikka kuvien oikaisu tehtiin huolellisesti, oli vanhalla ja uudella kuvalla kohteiden sijainnissa muutamien metrien eroja. Erotuskuvulle tämä sijainnin poikkeama aiheutti kuvakohinaa, joka hankaloitti tulkintaa. Tutkimuksessa käytetyt kuvaukset olivat toisistaan riippumattomia eli eri ajankohdan kuvien nadiiripisteet eivät olleet samat. Tästä johtuu että latvusten säteissiirtymät kuvilla olivat erilaisia. Nykyinen ilmakuvaustekniikka kuitenkin mahdollistaa kuvauspisteiden ohjelmoinnin etukäteen ja kuvauspisteiden synkronoinnin eri ajankohdan kuvausten välillä.

Varjon (1993) tutkimuksessa harvennuksista ja niihin verrattavissa olevista muista muutoksista tunnistettiin oikein satelliittikuvilla 40 %. Varjon tutkimuksissa on aineistona käytetty Metsähallituksen kuviotietoja, joissa kuviokoko on huomattavasti suurempi kuin yksityismetsätalouden tyypillinen kuviokoko. Tokolan ja Heikkilän (1997) mukaan satelliittikuvatulkinnan tarkkuus heikkenee voimakkaasti tulkittavan alan pienentyessä.

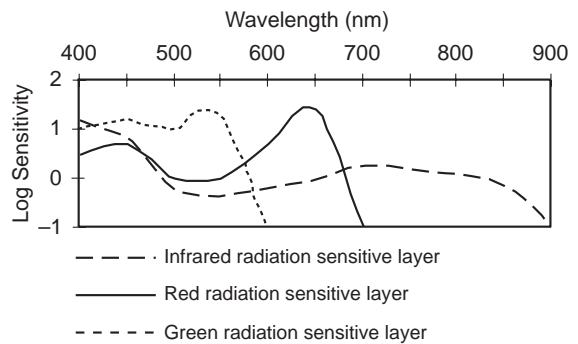
Menetelmän päätavoitteena on kohdentaa kuvatulkinna avulla maastotyöt ainoastaan muuttuneille alueille. Tämä tavoite saavutettiin, sillä maastotulkinnalla saatu tarkistettava pinta-ala oli loholla 1 noin 9 % (75 ha) ja loholla 3 noin 4 % (19 ha) koko lohkon pinta-alasta. Tuloksista kuitenkin nähdään, että muuttuneiksi tulkittuja kuvioita oli huomattavasti todellisia muutoskuvioita enemmän. Lohkon 1 tarkistettava ala on kohtuullisen laaja, koska aika kuvausajankohtien välillä oli vain yksi vuosi. Suurin osa muuttumattomista, mutta kuvulta muuttuneiksi tulkituista kuvioista oli heinittyneitä

avoaloja. Mikäli tulkinna on käytettävissä vanhat kuviotiedot, tällaiset virheet voidaan karsia jo tulkintavaiheessa.

Ongelma esitettyssä menetelmässä on lievien muutosten kuten harvennusten ja ehkä myös lievien metsäuhojen heikko erottuminen. Nämä tulkinna löytymättä jääneet muutokset ovat ongelmallisia, koska päivittämättöminä ne aiheuttavat suurimmat virheet kuviotietokantaan. Erotuskuvatulkintaa voisi täydentää metsänomistajan tekemillä metsänkayttöilmoituksilla sekä aiemman suunnitelman toimenpide-ehdotuksilla. Esimerkiksi kuvio, jolle on vanhassa suunnitelmassa merkitty kii-reellinen harvennus, mutta joka kovalta on tulkittu muuttumattomaksi, voidaan sisällyttää maasto-tarkistuksiin.

Ilmakuva on haastava kuvamateriaali numeeriselle kuvankäsittelylle. Filmierien erilaisuus, kuvan kehitys, kuvan skannaus jne. aiheuttavat vaihtelua kuvien välisissä sävyissä. Tämä muodostuu ongelmaksi tulkittaessa kuvia automaattisesti. Yksi ilmakuvalla ominainen piirre on filmin emulsiokerrosten herkkyysalueiden päällekkäisyys. Esimerkiksi lähi-infrapunalle herkän emulsiokerroksen herkkyysalue ulottuu vihreän valon alueelta lähi-infrapunan alueelle (kuva 5), kun sininen valo suodetaan pois. Tästä johtuu mm. etteivät skannatun kuvan RGB-värikanavat vastaa täysin kohteesta heijastuneita sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus-alueita. Esimerkiksi skannatun kuvan punainen väri ei täysin vastaa kohteesta heijastunutta puhtaan lähi-infrapunasäteilyn intensiteettiä vaan sisältää myös informaatiota muilta aallonpituusalueilta. Tämä hankaloittaa kanavasuhdeiden tulkintaa, sillä menetelmässä oletetaan, ettei aallonpituusalueissa ole päällekkäisyyksiä. Digitaaliset kuvausjärjestelmät tulevat kuitenkin poistamaan tämän ongelman.

Ilmakuvauksia suunniteltaessa pitäisi nykyistä enemmän kiinnittää huomiota kuvausajankohtaan. Kasvukauden vaihe, jolloin kuvat on otettu, vaikuttaa voimakkaasti tulokseen. Esimerkiksi avoalat ja taimikot poikkeavat maanpinnan heinittymisen vuoksi voimakkaasti alku- ja loppukesästä otettujen kuvien välillä. Myös ilmakuvauksen ja kuvien sijainnit voitaisiin kiinnittää esimerkiksi peruskarttalehdistöön. Nykyisissä kuvauslaitteissa olevat differentiaaliset GPS-laitteet mahdollistavat kuvauspaikkojen suunnittelemisen etukäteen hyvin-



**Kuva 5.** Kodak CIR 2443 väärävarifilmin emulsiokerrosten spektriset herkkyudet. Kuvassa ei ole huomioitu suotimien vaikutusta.

kin tarkasti.

Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksella tehdyssä tutkimuksessa on vertailtu eri menetelmiä ilmakuvan sisäisen sävyarvojen vaihtelun korjaamiseen (Holopainen ja Wang 1998). Saatujen tulosten mukaan parhaiten toimi menetelmä, jossa regressiomallilla kalibroidaan pikselien sävyarvot kuvan pääpisteen tasolle. Mallin selittäjinä ovat pikselien sijainti kuvakoordinaatistossa, jossa y-akseli on auringon säteilyn suuntainen. Hyviä tuloksia tuotti myös menetelmä, jossa kuvan 'varjoisen puolen' sävyarvohistogrammi muutettiin 'valoisian puolen' sävyarvohistogrammia vastaavaksi. Toisaalta menetelmä ei välttämättä toimi luotettavasti, jos kuvanosien sävyarvohistogrammit poikkeavat voimakkaasti toisistaan.

Tässä tutkimuksessa yllättävä tulos oli kalibroinnin regressiomallien huonot selityksasteet. Satelliittikuvilla tehdyissä tutkimuksissa eri ajankohdan kuvien välille tehtyjen mallien selityksasteet ovat vaihdelleet 0,6–0,9. Todennäköisesti syy huonoihin malleihin on se, etteivät kuvansisäiseen korjaukseen käytetyt kanavasuhdeet täysin poista kuvan sisällä olevaa sävyjen vaihtelua. Kohteen sijainti kuvalla siis edelleen vaikuttaa kohteen muunnettuihin sävyihin, mikä heikentää sävyjen riippuvuutta eri kuvausajankohtien välillä.

Koska eri ajankohtien kuvien sävyjen välillä ei ollut selkeitä positiivisia riippuvuuksia ja regressiomallien selityksasteet jäivät alhaisiksi, olisi myös eri ajankohdan kuvien väliseen kalibrointiin voitu käyttää histogrammien sovitusta. Menetelmä soveltuu

myös eri ajankohdan kuvien kalibrointiin samalla tavoin kuin vierekkäisten kuvien kalibrointiin erityisesti silloin kun kuvien välinen riippuvuus on epälineaarinen. Erona on vain, että kalibrointiin käytetään koko kuvamosaiikin alaa. Etuna on, että kalibrointi on yksinkertaisempi tehdä ja se on myös laskennallisesti kevyempi.

Kaukokartoitukseen perustuvassa muutosten tunnistamisen menetelmässä yhtenä ongelmana on muutoksen jälkeisen tilan selvittäminen. Nykyiset automaattiset kuvantulkintamenetelmät eivät kuviotasolla pysty tuottamaan riittävän tarkkoja puustotunnusennusteita metsäsuunnittelun tarpeisiin. Tätä taustaa vasten varteenotettavin vaihtoehto muutoksen jälkeisen tilan selvittämiseen lieneekin maastossa tehtävä kuviotietojen tarkastus.

Hakkuiden myötä muuttuneet kuvionrajat ja kuvioiden pinta-alat ovat potentiaalinen virhelähde kuviotiedoille, mikäli kuvioiden rajoja ei päivitetä toimenpiteiden jälkeen kuviokartoille. Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa tehty tutkimus (Hyppänen ym. 1996) osoittaa, että ilman kaukokuvia tai satelliittipaikannusta (GPS) tehty kuvionrajojen päivitys on varsin virheellistä. Selkeät muuttuneet kuvionrajat voidaan päivittää suoraan erotuskuvilta. Tarkkuuden kannalta paras vaihtoehto harvennusten rajaukseen olisi leimikon rajauksen yhteydessä tehtävä rajojen päivitys GPS:llä. Ongelmana on GPS-laitteen epävarma toiminta tiheän latvuspeiton alla. Saatujen kokemusten mukaan kuvionrajauksen päivityksessä käytettävän GIS-järjestelmän tulisi mahdollistaa rajojen joustava muokkaaminen ja myös kuvion puustotietojen tarkastelun automaattisesti digitoinnin yhteydessä.

Menetelmän käyttöönoton edellytyksenä on, että sillä saavutetaan metsäsuunnittelussa kustannussäästöjä. Yhden vuoden kuvausvälikävyllä esitetty menetelmä tuskin on kustannustehokas. Vastaavasti kuvausväliä kasvatettaessa kuvien kalibrointi vaikeutuu. Kun aikajaksoa pidennetään, vaikuttavat metsän luonnolliset muutokset, kuten kasvu ja lehti-puuosuuden muuttuminen, voimakkaasti kuvan sävyarvoihin.

## Kiitokset

Tutkimus tehtiin osana 'Kaukohavainnointiin perustuva metsätulkinta' hanketta, jossa kehitettiin menetelmiä numeeristen ilmakuvien hyödyntämiseksi Metsäkeskusten toiminnassa. Projektiin osallistivat Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan lisäksi Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Hämeen-Uudenmaan ja Pohjois-Savon Metsäkeskukset, FM-Kartta Oy, Euroopan Metsäinstituutti sekä Eesti Metsäkorraldus. Hankkeen rahoitti Teknologian kehittämiskeskus TEKES.

Haluan kiittää Urpo Nikusta Metsätalouden kehittämiskeskus Tapiosta, Heikki Luukkosta, Pekka Karpiota ja Kaija Peltola FM-Kartta Oy:stä sekä Juha Hiltusta ja Pirjo Rissasta Pohjois-Savon Metsäkeskuksesta avusta tutkimuksen toteuttamisessa.

## Kirjallisuus

- Gopal, S. & Woodcock, C. 1996. Remote sensing of forest change using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2): 398–404.
- Holopainen, M. 1992. Digitaalisen väri-infraortokuvan käyttökelpoisuus metsätalouden suunnittelussa ja veroluokituksessa. Metsänarvioimistieteen tutkielma MMK-tutkintoa varten. Helsingin yliopisto. 100 s.
- 1995. Kaukokartoitus luonnon monimuotoisuuden inventoinnissa. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus ja maanmittaustekniikan osasto. Diplomityö.
- & Lukkarinen, E. 1994. Digitaalisten ilmakuvien käyttö metsävarojen inventoinnissa. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 4. 33 s.
- & Wang, G. 1998. The calibration of digitized aerial photographs for forest stratification. *International Journal of Remote Sensing* 19: 677–696.
- Hyppänen, H. 1996. Spatial autocorrelation and optimal spatial resolution of optical remote sensing data in boreal forest environment. *International Journal of Remote Sensing* 17(17): 3441–3452.
- , Pasanen, K. & Saramäki, J. 1996. Päätehakkuiden kuviorajojen päivytystarkkuus. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1996(4): 321–335.
- Häme, T. 1991. Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images. *Acta Forestalia Fennica* 222: 1–111.
- Kangas, A. 1996. On the bias and variance in tree volu-

- me predictions due to the model and measurement errors. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11: 281–290.
- 1997. On the prediction bias and variance in long-term growth projections. *Käsikirjoitus*. 22 s.
- Olsson, H. 1994. Monitoring of local reflectance changes in boreal forests using satellite data. Väitöskirja. Swedish University of Agricultural Sciences. Remote Sensing Laboratory. Report 7. Umeå.
- Pasanen, K. & Hyppänen, H. 1995. Tulevaisuuden metsänarviointi ja metsäsuunnittelun tarpeet – metsänarvioinnin uudet tuulet. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1995(2): 141–147.
- Singh, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 10(6): 989–1003.
- Tokola, T. & Heikkilä, J. 1997. Improving satellite image based forest inventory by using a priori site quality information. *Silva Fennica* 31(1): 67–78.
- Varjo, J. 1993. Controlling continuously updated forest data by satellite remote sensing. *Metsätalouden suunnittelun lisensiaatintutkielma*. Joensuun yliopisto. 66 s.
- 1995. Forest change detection by satellite remote sensing in eastern Finland. *EARSeL advances in remote sensing* 4(3): 102–105.
- 1996. Controlling continuously updated forest data by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 17(1): 43–67.

## 17 viitettä