



■ Janne Uuttera



■ Perttu Anttila



■ Aki Suvanto



■ Matti Maltamo

Janne Uuttera, Perttu Anttila, Aki Suvanto ja Matti Maltamo

Yksityismetsien metsävaratiedon keruuseen soveltuvilla kaukokartoitusmenetelmillä estimoitujen puustotunnusten luotettavuus

Uuttera, J., Anttila, P., Suvanto, A. & Maltamo, M. 2006. Yksityismetsien metsävaratiedon keruuseen soveltuvilla kaukokartoitusmenetelmillä estimoitujen puustotunnusten luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2006: 507–519.

Yksityismetsien metsävaratiedon keruuseen tarvitaan lähitulevaisuudessa kustannustehokkaampia menetelmiä. Tässä tutkimuksessa vertailtiin kaukokartoitusmenetelmien ja nykymuotoisen maastoinventoinnin luotettavuutta samoilla testialueilla. Testatut kaukokartoitusmenetelmät olivat: 1) fotogrammetrisiin puumittauksiin ja visuaaliseen puulajitulkintaan perustuva ilmakuvatulkinta, 2) puoliautomaattinen yksinpuintulkinta numeeriselta ilmakuvulta, 3) puoliautomaattinen yksinpuintulkinta ilmakuvulta ja laserkeilausaineistosta ja 4) laserkeilainaineiston korkeusjakaumaan perustuva menetelmä.

Laserkeilainaineiston korkeusjakaumaan perustuva menetelmä oli kokonaisuutena testatuista menetelmistä luotettavin. Tällöin metsikkökohtainen puuston kokonaistilavuuden suhteellinen keskivirhe (%) oli 18,8 ja 17,8 tutkimuksen kahdella testialueella. Menetelmällä saatiin jopa luotettavimmat metsikkötason puustotunnukset kuin nykymuotoisella maastoinventoinnilla. Ilmakuvien fotogrammetrisellä mittauksella ja visuaalisella tulkinnalla saatiin luotettavia tuloksia puuston keskipituuden ja -läpimitan suhteen, mutta puuston pohjapinta-alan ja tilavuuden arviointi tuotti menetelmällä vaikeuksia. Yhdistämällä laserkeilainaineisto puoliautomaattiseen yksinpuintulkintaan saatiin luotettavimmat tulokset kuin soveltamalla tulkintamenetelmää ainoastaan ilmakuvaan.

Seuraavan metsävaratietojärjestelmän tiedonkeruu- ja ylläpitomenetelmät sisältävät kaukokartoitusperusteisia menetelmiä yhdistettynä kevennettyyn maastoinventointiin sekä metsävaratiedon jatkuvaa ylläpitoa ja laskennallista ajantasaistusta. Kaukokartoitusmenetelmien osalta vuosituuhannen vaihteen jälkeen tehty tutkimus osoittaa, että luotettavimmat tulokset saadaan laserkeilainaineiston ja ilmakuvan yhdistelmällä, jolloin voidaan tuottaa myös puulajeittaisia puustotunnuksia.

Asiasanat: Ilmakuva, kaukokartoitus, lidar, metsien inventointi, metsäsuunnittelu
Yhteystiedot: Uuttera: Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, Soidinkuja 4, 00700 Helsinki;
Anttila, Suvanto & Maltamo: Joensuun yliopisto, metsät. tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu
Sähköposti janne.uuttera@tapio.fi
Hyväksytty 26.9.2006

I Johdanto

Suomen metsäpinta-alasta n. 61 % on yksityisomistuksessa (Metsäntutkimuslaitos 2003). Yksityismetsien metsävaratiedon keruu ja tilakohtaisten metsäsuunnitelmien tuottaminen on alueellisten metsäkeskusten lakisääteinen tehtävä (1475/1995). Tilakohtainen metsäsuunnitelma on tärkeä työkalu metsänomistajan ja metsäammattilaisen päätöksenteossa, metsänomistajan neuvonnassa sekä monimuotoisuuden ylläpidossa. Tämän vuoksi metsäsuunnittelua tuetaan julkisin varoin Maa- ja metsätalousministeriön toimesta. Metsäsuunnitelma on voimassa yleensä 10 vuotta ja voimassaolevien metsäsuunnitelmien pinta-ala vuonna 2004 oli n. 9,1 miljoonaa hehtaaria (Tapio 2005).

Nykyinen ns. aluesuunnittelu perustuu kattavaan metsikkökohtaiseen maastoinventointiin (ns. *Solmu*-tiedonkeruumalli). Menetelmä sisältää ennakkovalmisteluvaiheen ja maastotyövaiheen. Ennakkovalmistelussa inventoitava alue jaetaan metsikkökuvioihin hyödyntäen tuoretta ilmakuvaa, vanhaa inventointiaineistoa ja muuta paikkatietoaineistoa. Ilmakuvatulkinta on visuaalista tulkintaa ja aineistona on tyypillisesti 1:30 000 mittakaavainen (maastoerotuskyky 0,5 m) vääräväri-ortokuva. Metsikkökuviorajaus tehdään kuvaruutudigitointina ja siinä pyritään rajaamaan kasvupaikkatunnuksiltaan ja puustoltaan homogeenisia alueita. Merkittävänä tekijänä kuviorajauksessa on myös tulevan metsänhoidollisen toimenpiteen tarve. Alue, jolla tuleva hoitotoimenpide ja sen ajoitus on sama, rajataan yleensä samaksi kuvioksi. Keskimääräinen kuvio koko yksityismetsissä on n. 1,5 hehtaaria.

Metsäsuunnittelua varten kerätään metsävaratieto käymällä maastossa jokaisella kuviolla. Kuviorajaus tarkistetaan maastossa ja kuviolta arvioidaan sen kasvupaikkatunnuksukset sekä puustotunnuksukset puulajeittain ja puujakoittain. Puustotiedot perustuvat mittauksiin, joita tehdään kuviolle subjektiivisesti sijoitetuilta koealoilta (5–8/kuvio). Osa metsäsuunnittelulaskennassa tarvittavista metsikkötunnuksista, kuten puuston tilavuus, tuotetaan malleilla metsäsuunnittelujärjestelmässä (MELA; Siitonen ym. 1996) maastossa arvioituihin tunnuksiin perustuen. Kuvion perus- ja puustotietoihin perustuen jokaiselle kuviolle annetaan ehdotus tulevasta toimenpitees-

tä. Metsävaratiedon keruun yhteydessä kartoitetaan myös metsäalueen ekologisesti arvokkaat kohteet ja muut erityiskohteet (esim. arvokkaat muinaisjäännekohteet).

Nykymuotoisen kuvioittaiseen arviointiin perustuvan menetelmän luotettavuus riippuu kunkin maastotyötä tekevän metsäammattilaisen ammattitaidosta ja kokemuksesta. Puustotietojen luotettavuudessa onkin suurta vaihtelua. Esimerkiksi konnaistilavuuden metsikkökohtainen suhteellinen keskivirhe voi vaihdella välillä 18–38 % (ks. mm. Haara ja Korhonen 2004), mikä johtuu suurimmalta osalta mallinnuksen lähtötiedon, eli maastossa arvioidun tiedon, virheellisyydestä. Maastoinventoinnin kustannukset vaihtelevat hieman Suomen eri osissa, mutta valtakunnallinen keskiarvo vuonna 2004 oli 9,2 €/ha. Aluesuunnittelua on tehty viime vuodet noin miljoona hehtaaria vuodessa (Tapio 2005).

Suomen yksityismetsien metsävaratiedon keruu ja ylläpito tulee hyvin todennäköisesti muuttumaan menetelmällisesti varsin voimakkaasti seuraavan viiden vuoden aikana. Maa- ja metsätalousministeriön metsäsuunnittelustrategian (Maa- ja metsätalousministeriö 2001) yhtenä avaintehtävänä on kehittää ja toteuttaa uusi metsävaratietojärjestelmä vuoteen 2010 mennessä. Uudessa metsävaratietojärjestelmässä tulee tiedon keruuta tehostaa hyödyntämällä kaukokartoitusmenetelmiä.

Tämän tutkimuksen tavoite oli vertailla erilaisten kaukokartoitusmenetelmien tuottamien metsikkötunnusten luotettavuutta. Menetelmät maastotes-teihin valittiin tehtyihin tutkimuksiin perustuvan esiselvityksen avulla, jossa otettiin huomioon luotettavuuden ja kustannustekijöiden lisäksi myös se, miten menetelmä soveltuu Suomen yksityismetsien metsäsuunnitteluprosessiin. Menetelmien valintaan vaikutti myös se, onko kaukokartoitusmenetelmästä olemassa käytännön sovellutuksia ja markkinoilla palveluntarjoajia tai onko menetelmä vietävissä käytäntöön lyhyellä aikavälillä. Esiselvitys tehtiin yhdeksän asiantuntijan voimin ja se katsoi tutkimukset ja testit, joissa on käytetty keskiresoluutioisia monikanavaisia luonnonvarasatelliittiaineistoja (mm. Holmgren ym. 2000, Halme ja Tomppo 2001, Franco-Lopez ym. 2001, Hyvönen 2002), numeerisia ilmakuvia tai korkean resoluution monikanavaisia satelliittiaineistoja (mm. Dralle 1997, Inkinen 1997, Brandtberg 1999, Næset 2002a, Astola ym.

2004, Korpela 2004, Kayitakire ym. 2006, Olofsson ym. 2006), hyperspektrometriaineistoa (mm. Hyyppä ym. 2000), satelliittitutka-aineistoa (mm. Pulliainen ym. 2003, Mette ym. 2003, Del Frante ja Solimini 2004) ja laserkeilainaineistoa (ALS) (mm. Nasset 1997, 2002b, 2004, Hyyppä ym. 1999, Maltamo ym. 2006).

Kaukokartoitusmenetelmät, jotka valittiin vertailtaviksi, olivat: 1) fotogrammetrisiin puutason mittauksiin ja visuaaliseen puulajitulkintaan perustuva ilmakuvatulkinta (*PhotoAP*), 2) puoliautomaattinen yksinpuintulkinta numeeriselta ilmakuvulta (*SegAP*), 3) puoliautomaattinen yksinpuintulkinta ilmakuvulta ja laserkeilausaineistosta (*SegALS*) ja 4) laserkeilainaineiston korkeusjakaumaan perustuva menetelmä (*PhdALS*). Vertailuun otettiin mukaan myös nykymuotoinen maastoarviointiin perustuva kuvioittainen arviointi (*Solmu*), joka on kuvattu tässä luvussa.

2 Aineisto

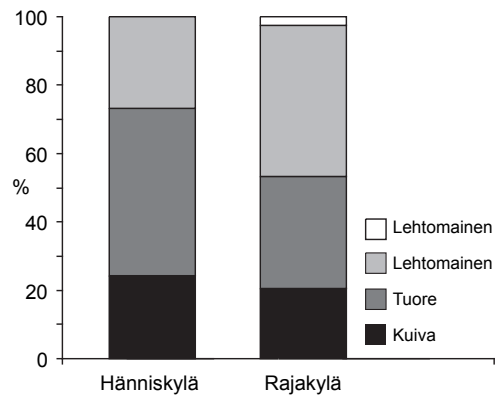
2.1 Maastoaineisto

2.1.1 Testialueet

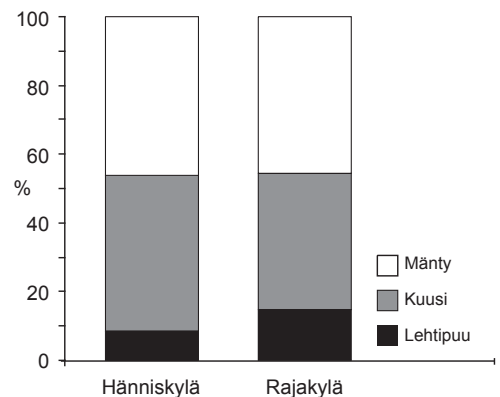
Testeihin valittiin kaksi testialuetta, jotka poikkesivat puuston rakenteeltaan toisistaan. Testialueet olivat Hänniskylä Keski-Suomessa (62°31'N, 26°08'E) ja Rajakylä Kaakkois-Suomessa, lähellä Venäjän tasavallan rajaa (61°03'N, 28°36'E). Molemmat testialueet edustavat sinänsä tyypillistä suomalais-ta talousmetsää.

Hänniskylän testialue sisälsi 795 kuviota (keskikoko 1,48 ha) ja Rajakylän testialue 509 kuviota (keskikoko 1,25 ha). Kaksi metsäsuunnittelijaa (yksi kummallakin alueella) teki Solmu-muotoisen maastoinventoinnin heinä–elokuussa 2004. Taimikkokuvioita ei sisällytetty vertailututkimukseen. Näiden kehitysluokkien (pieni ja varttunut taimikko) pinta-alaosuudet olivat 24 % Hänniskylässä ja 17 % Rajakylässä.

Hänniskylän testialueen kasvupaikkajakauma painottui karumpiin kasvupaikkaluokkiin verrattuna Rajakylän testialueeseen. Tämän vuoksi Hänniskylän testialueen puulajijakauma painottui enemmän



Kuva 1. Testialueiden kasvupaikkajakaumat. Lehto = *Oxalis-Maianthemum*-tyyppi (Cajander 1926), Lehtomainen = *Oxalis-Myrtillus*-tyyppi, Tuore = *Myrtillus*-tyyppi, Kuiva = *Vaccinium*-tyyppi ja karumpi.



Kuva 2. Vallitsevien puulajien pinta-alaosuudet testialueilla.

mäntyyn (*Pinus sylvestris*) ja kuuseen (*Picea abies*), kun taas Rajakylän rehevämällä kasvupaikoilla suurempi osuus oli myös lehtipuuvaltaisia metsiä (*Betula pendula*, *Betula pubescens*, *Populus tremula*, *Alnus incana*, *Alnus glutinosa*) (kuvat 1 ja 2).

2.1.2 Maastoreferenssiaineisto

Menetelmävertailu tehtiin joukossa satunnaisesti valittuja metsiköitä, jotka tarkistusmitattiin. Vertailumetsiköiksi valittiin ainoastaan puuston kehitysvaiheelta varttuneita metsiköitä (nuorista kasvatusmetsistä uudistuskypsiin metsiin). Hänniskylän testialueelta tarkistusmittaukseen valittiin 50

metsikköä ja Rajakylän testialueelta 55 metsikköä. Tarkistusmittaus tehtiin sijoittamalla systemaattisesti kunkin valitun metsikön sisään kiinteäsäteisiä ympyräkoaloja. Mitattavan kuvion minimikooksi asetettiin 1 hehtaari, jotta voitiin varmistua siitä, että

Taulukko 1. Koalojen lukumäärä tarkistusmittauksessa suhteessa metsikön pinta-alaan.

Pinta-ala (ha)	Koalat
1,00–1,50	5
1,51–2,50	6
2,51–3,50	7
3,51–4,50	8
4,51–	9

Taulukko 2. Koealan säde tarkistusmittauksessa suhteessa metsikön kehitysluokkaan.

Kehitysluokka	Säde (m)
Nuori kasvatusmetsä	5,64
Varttunut kasvatusmetsä	7,50
Uudistuskypsä metsä	10,00

kuvion sisään mahtuu riittävästi koaloja. Koalamäärät vaihtelivat kuvion pinta-alan suhteen (taulukko 1) ja koealan säde metsikön kehitysvaiheen mukaan (taulukko 2). Koalojen sijainti määritettiin käyttäen GPS-paikanninta.

Maastoreferenssiaineistossa koeralta mitattiin jokainen puu, joka ylitti rinnankorkeusläpimitaltaan 5 cm. Puista määritettiin puulaji ja rinnankorkeusläpimitta 1,3 metrin korkeudelta (dbh). Puulajimäärittämisessä käytettiin vain kolmea luokkaa: mänty, kuusi, lehtipuu. Jokaisesta koeralalla esiintyvistä puulajiositteesta valittiin koepuiksi puu, joka oli rinnankorkeusläpimitaltaan lähimpänä pohjapinta-alamediaanipuuta. Koepuista mitattiin pituus ja määritettiin ikä.

Maastoreferenssiaineiston laskennoissa jokaiselle koelan puulle ennustettiin pituus pituusmalleilla (Veltheim 1987). Pituudet kalibroitiin koepuupituuksilla käyttäen suhteellista kalibrointia. Koala-aineiston puille ennustettiin tilavuus Laasasenahon runkokäyrämalleilla (Laasasenaho 1982). Metsikkökohtaiset puustotunnukset johdettiin metsikön koalojen puustotunnuksista yleistämällä (taulukko 3).

Taulukko 3. Tarkistusmitattujen metsiköiden metsikkötunnusten keskiarvot (ka) ja keskihajonnat (sd).

Testialue Kehitysluokka ¹	N ²	H ³ (m)	D ⁴ (cm)	G ⁵ (m ² /ha)	V ⁶ (m ³ /ha)	V _{mänty} ⁷ (m ³ /ha)	V _{kuusi} ⁷ (m ³ /ha)	V _{lehtipuu} ⁷ (m ³ /ha)
HÄNNISKYLÄ								
kaikki	50 ka	16,4	19,1	19,3	160,1	66,8	72,1	21,2
	sd	5,4	6,7	6,1	81,8	62,3	84,4	26,3
02	19 ka	11,2	12,8	15,0	88,7	40,9	29,1	18,7
	sd	3,5	3,5	6,8	56,1	37,0	54,7	16,1
03	17 ka	17,1	19,4	20,6	170,4	84,1	67,4	18,9
	sd	2,8	3,1	3,7	44,3	58,9	73,4	30,7
04	14 ka	22,6	27,1	23,6	244,3	80,8	136,1	27,4
	sd	3,0	3,6	3,6	56,9	83,1	94,5	32,2
RAJAKYLÄ								
kaikki	55 ka	18,4	22,7	26,9	234,4	84,6	112,0	37,8
	sd	4,8	7,1	7,5	97,7	86,7	112,4	44,2
02	21 ka	13,6	15,3	21,7	146,2	60,1	58,0	28,1
	sd	2,5	2,8	6,9	55,9	64,1	65,4	21,8
03	22 ka	20,2	25,2	29,8	279,3	107,1	138,5	33,7
	sd	3,3	3,9	6,7	85,4	101,5	125,4	33,5
04	12 ka	23,4	30,9	30,5	306,3	85,9	158,0	62,4
	sd	2,0	3,8	4,7	52,3	87,1	122,1	75,6

¹ kaikki = kehitysluokat 02, 03 ja 04; 02 = nuori kasvatusmetsä; 03 = varttunut kasvatusmetsä; 04 = uudistuskypsä metsä;

² tarkistusmitattujen metsiköiden lukumäärä; ³ puuston keskipituus; ⁴ pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta;

⁵ pohjapinta-ala; ⁶ puuston kokonaistilavuus; ⁷ puulajiluokittaiset puuston tilavuudet

2.2 Kaukokartoitusaineisto

2.2.1 Numeeriset ilmakuvat

Testialueet kuvattiin mittakaavassa 1:20 000 (kuvauskorkeus 3066 m) kesällä 2004. Kuvauksessa käytettiin KODAK Aerochrome III 1443 -vääriväriä ja Leica RC20/30 -kameraa (polttoväli 153.180 mm). Hänniskylän testialue kuvattiin 10.7.2004 kello 10:00 käyttäen 60 %:n pituuspeittoa ja 30 %:n sivupeittoa, joilla testialueelle sijoittui kuusi lentolinjaa ja aineisto muodostui 42:sta ilmakuvasta. Rajakylän testialue kuvattiin 2.7.2004 kello 11:00. Sekä pituus- että sivupeitto olivat 60 %, jolloin testialueelle sijoittui kolme lentolinjaa, ja aineisto muodostui 12:sta ilmakuvasta.

Filmikuvat skannattiin Leica DXW600 -skannerilla käyttäen skannausresoluutiota 14 µm ja kuvat orto-oikaistiin käyttäen maastomallia, joka tuotettiin alueilta keilatuista laserkeilainaineistoista (ks. luku 2.2.2). Lopullisten numeeristen ilmakuvien, joita käytettiin Solmu-inventoinnissa ja numeerisissa tulkinnoissa (*SegAP* ja *SegALS*), maastoresoluutioksi asetettiin 0,5 m.

2.2.2 Laserkeilainaineisto

Testialueet myös laserkeilattiin kesällä 2004. Keilaus suoritettiin Optechin ALTM1233 keilaimella, jonka teknologia oli päivitetty myöhemmän version ALTM2033 mukaiseksi. Keilaimen maksimitaajuus oli 33 kHz, ja jokaisesta pulssista voitiin tallettaa kaksi vastehavaintoa (first ja last pulse). Keilauksessa käytettiin n. 2000 m:n lentokorkeutta ja 15 asteen avauskulmaa, joten aineistossa oli n. 0,45 havaintoa neliometrillä. Hänniskylän testialue keilattiin 3.8.2004 illalla 10:21–10:50 ja Rajakylän testialue 5.8.2004 aamulla 9:00–9:20.

Laseraineistoista tuotettiin maastomallit ja ns. pintamallit (DSM), joiden pikselikooksi asetettiin 1 metri. Maanpinnan korkeusvaihtelu Hänniskylässä oli 89–216 metriä merenpinnan yläpuolella (mpy) ja Rajakylässä 36–161 metriä mpy.

3 Menetelmät

3.1 Ilmakuvien fotogrammetrinen mittaus ja visuaalinen tulkinta (*PhotoAP*)

Ilmakuvien stereoskooppinen visuaalinen tulkinta tehtiin digitaalisilla fotogrammetrisilla työasemilla. Jokaisen metsikön sisään sijoitettiin systemaattinen koealaverkko ja koealamäärien ja koealan säteen määrittämisessä käytettiin samoja sääntöjä kuin tarkistusmittauksissa (Taulukot 1 ja 2). Tulkinnan ensimmäisessä vaiheessa kunkin koealan puiden latvusten huiput tunnistettiin visuaalisesti ja puille mitattiin pituudet hyödyntäen laseraineistosta muodostettua maastomallia. Puiden tyvien korkeuksien mittaamista stereomallilta myös yritettiin, mutta tiheissä metsiköissä puiden tyvipisteet olivat harvoin nähtävissä. Tämän vuoksi lähtökohdaksi otettiin, että käytettäessä *PhotoAP*-menetelmää täytyy olla käytettävissä myös tarkka maastomalli alueelta.

Pituuksien mittaamisen lisäksi jokaisen puun puulaji arvioitiin käyttäen kolmea puulajiluokkaa: mänty, kuusi ja lehtipuu. Puun pituutta käytettiin ennustavana muuttujana estimoitaessa puun rinnankorkeusläpimittaa valtakunnallisilla allometrisilla malleilla (Kalliovirta ja Tokola 2005). Puiden tilavuudet estimoitiin käyttäen Laasasenahon (1982) runkokäyrämalleja ja metsikön puustotunnukset johdettiin koealatiedot yleistämällä.

Kaksi kokenutta kuvatulkitsijaa määrittä latvusten huippujen sijainnit, ja kaksi metsäammattilaista, joilla oli myös pitkä kokemus kuvatulkinnasta, tulkitsi puulajin. Kukin tulkitsija työskenteli vain yhdellä testialueella.

3.2 Puoliautomaattinen yksinpuintulkinta ilmakuvasta ja laserkeilainaineistosta (*SegAP* ja *SegALS*)

Puoliautomaattinen yksinpuintulkinta (ITC) jaettiin kahteen alamenetelmään riippuen siitä, mitä aineistoa käytettiin yksittäisten puiden latvusten segmentoinnissa. Menetelmässä *SegAP* käytettiin ainoastaan numeerisen ilmakuvan informaatiota, kun taas menetelmässä *SegALS* puut määritettiin laserkeilainaineistosta ja puulajitulkinnessa hyö-

dynnettiin ilmakeiva-aineistoa. *SegAP*-menetelmässä ilmakeivat suodatettiin sävyarvoeroja vaimentavalla suodatuksella ennen yksittäisten puiden sijainnin määrittämistä. Tämä tehtiin, jotta yksittäisen puun latvuksen alueella olisi sävyarvoissa vain yksi paikallinen maksimiarvo. Määritettyjä paikallisia maksimeja käytettiin lähtöpisteinä alueperusteiselle segmentointialgoritmillemme. Suodatuksen voimakkuutta ja segmentointialgoritmin parametreja säädettiin metsikkökohtaisesti siten, että visuaalisesti tarkasteltuna saatiin tyydyttävä tulos. Segmentointimenetelmä on kuvattu yksityiskohtaisesti julkaisussa Maltamo ym. (2003). Menetelmässä *SegALS* hyödynnettiin samaa segmentointimenetelmää, mutta paikalliset maksimit määritettiin laserkeilainaineistosta muodostetusta pintamallista (ks. mm. Hyyppä ym. 2001).

Molemmilla yllä mainituissa menetelmissä puulajitulkinta tehtiin puutasolla hyödyntäen neuroverkkoa, joka opetettiin osoittamalla manuaalisesti visuaaliseen tulkintaan perustuen puusegmenttejä jokaiseen puulajiluokkaan. Automaattisessa tulkinna puulajitulkintakriteerinä käytettiin segmentin sävyarvojen keskiarvoa.

Yksittäisten puiden pituus ja rinnankorkeusläpimitta ennustettiin allometrisilla malleilla, joissa selittävänä muuttujana oli puusegmentin maksimileveys (Kalliovirta ja Tokola 2005). Puiden tilavuudet laskettiin Laasasenahon runkokäyrämalleilla (Laasasenaho 1982), ja metsikön puustotunnukset johdettiin yksittäisten puiden dimensioiden avulla. Tulkinna teki yksi henkilö kummallakin testialueella.

3.3 Laserkeilainaineiston korkeusjakamaan perustuva menetelmä (PhdALS)

Laserkeilainaineiston korkeusjakamaan perustuva menetelmä (*PhdALS*) tuotti suoraan estimaatit kaikille puustotunnuksille hyödyntäen ainoastaan laserkeilainaineistoa. Samankaltaista lähestymistapaa ovat käyttäneet tutkimuksissaan aikaisemmin mm. Næsset (2002b, 2004) ja Holmgren (2004). Puustotunnusten ennustaminen perustui regressiomalleihin, joita sovellettiin kaikille koalatason puustotunnuksille (pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, pohjapinta-alalla painotettu puuston pi-

tuus, runkoluku, pohjapinta-ala ja puuston kokonais-tilavuus) erikseen (Suvanto ym. 2005). Malleissa käytettiin selittävinä muuttujina laserkeilainaineistosta laskettuja korkeusjakaumatunnuksia, joita ovat tyypillisesti mm. korkeushavaintojen maksimi- ja keskiarvot, havaintojen keskihajonta ja variaatiokerroin sekä prosenttipisteet ja korkeuskvantiilit (mm. Næsset 2002b, 2004). Tässä tutkimuksessa käytetyt koalatason sekamallit oli tehty Generalized Least Square -menetelmällä johtuen mallitusaineiston hierarkkisesta rakenteesta (koalat ja metsiköt). Sovellatut mallit on esitetty yksityiskohtaisesti julkaisussa Suvanto ym. (2005).

Testialueilla käytetyt regressiomallit oli estimoitu erillisestä mallinnusaineistosta, joka oli kerätty maantieteellisesti eri alueelta, n. 300 km pohjoiseen Rajakylän testialueesta ja n. 150 km itään Hänniskylän testialueesta (Suvanto ym. 2005). Mallinnusaineisto keilattiin käyttäen samaa laserkeilainta (ALTM2033) kuin tämän tutkimuksen testialueiden aineiston keruussa. Keilausajankohta oli sama kuin sovellusaineistolla (3.8.2004), mutta mallinnusaineistossa oli hieman enemmän pulssihavaintoja ($0,7/m^2$). Soveltamalla eri aineistosta laadittuja malleja pyrittiin samalla testaamaan mallien siirrettävyyttä aineistojen välillä ja maantieteellisesti Suomen olosuhteissa.

Laserpulssien korkeushavainnot laskettiin molemmille testialueille hyödyntäen aineistosta muodostettuja maastomalleja. Regressiomallien selittävät muuttujat laskettiin laseraineistosta testialueiden jokaiselle metsikölle. Sovellettaessa laseraineistoa ei tässä tutkimuksessa estimoitu puulajiluokittaisia tuloksia, vaan tuotettiin estimaatit vain koko puustolle.

3.4 Puustotunnusestimaattien luotettavuuden arviointi

Puustotunnusestimaattien luotettavuutta arvioitiin suhteellisen tarkkuuden ja systemaattisen virheen tarkastelun avulla. Estimaattien tarkkuutta mitattiin keskineliövirheellä (RMSE%):

$$\text{RMSE\%} = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right)^{0.5}}{\bar{y}} \cdot 100\% \quad (1)$$

jossa y_i on tunnuksen “oikea” arvo tarkistusmittausaineistossa metsikölle i , \hat{y}_i menetelmän tuottama tunnuksen estimaatti, \bar{y} oikeiden arvojen keskiarvo, ja n on metsiköiden lukumäärä. Systemaattisen virheen eli harhan (bias) suuruutta estimoitiin seuraavalla kaavalla:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (2)$$

Harhan tilastollista merkitsevyyttä ($p < 0,05$) testattiin kaksisuuntaisella t-testillä. Tulosten luotavuutta suuraluetasolla tarkasteltiin vertailemalla menetelmien tuottamia puuston kokonaistilavuuksien estimaatteja tarkistusmittauksen tuottamaan tulokseen koko tarkistusmitatussa kuviojoukossa.

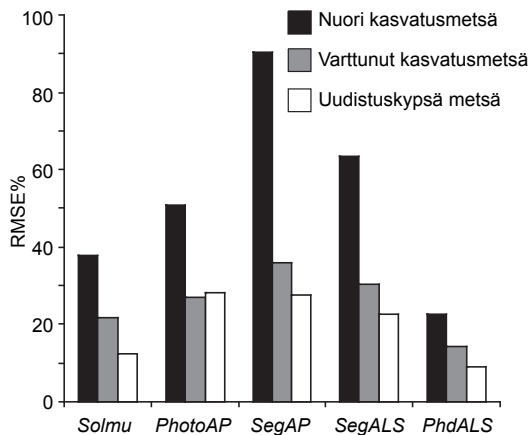
4 Tulokset

Eri menetelmien tuottamat puustotunnusten suhteelliset keskivirheet ja harhat on esitetty taulukossa 4. Laserkeilainaineiston korkeusjakaumaan perustuva mallinnus (*PhdALS*) oli kokonaisuutena ottaen menetelmistä kaikkein luotettavin, vaikka estimaatit olivatkin harhaisia varsinkin Hänniskylän alueella. Nykymuotoinen maastoinventointi (*Solmu*) oli lähes yhtä luotettava menetelmä. *PhdALS* oli luotettavin menetelmä aina ennustettaessa puuston kokonaistilavuutta ja runkolukua, mutta tarkin tai lähellä tarkinta estimaattia myös muiden tunnusten suhteen (taulukko 4). Ilmakuvien fotogrammetrinen mittaus ja stereotulkinta tuottivat hyviä estimaatteja puuston keskipituuden ja keskiläpimitan suhteen, mutta puuston runkolukuarvioiden epätarkkuus johti epäluotettaviin estimaatteihin pohjapinta-alassa ja puuston tilavuudessa.

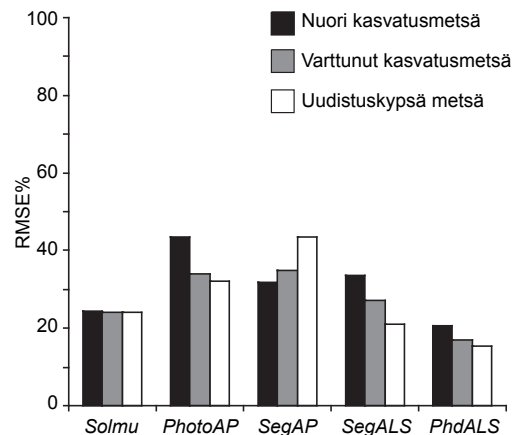
Taulukko 4. Puustotunnusestimaattien luotettavuus suhteessa tarkistusmitattuun aineistoon. RMSE% = suhteellinen keskivirhe, Bias = harha. Menetelmät, ks. Luku 3. Harhan tilastollinen merkitsevyyks ($p < 0,05$) on osoitettu *-merkillä.

Testialue ja menetelmä	Tunnusluku	H ¹	D ²	N ³	G ⁴	V ⁵
HÄNNISKYLÄ						
<i>Solmu</i>	RMSE%	15,4	13,7	44,6	18,1	21,6
	Bias	0,3	-0,4	103,4	-0,1	-0,7
<i>PhotoAP</i>	RMSE%	11,6	12,4	57,1	33,9	33,1
	Bias	0,6 *	0,2	506,9 *	3,7 *	18,1 *
<i>SegAP</i>	RMSE%	33,0	29,6	47,2	37,6	46,7
	Bias	2,6 *	2,3 *	373,5 *	0,7	-1,6
<i>SegALS</i>	RMSE%	20,7	17,3	50,0	31,1	34,7
	Bias	1,6 *	1,0 *	407,3 *	0,9	-8,8
<i>PhdAls</i>	RMSE%	9,1	13,1	40,7	22,8	18,8
	Bias	0,2	-0,9 *	315,2 *	-2,6 *	-14,1 *
RAJAKYLÄ						
<i>Solmu</i>	RMSE%	10,0	10,3	50,5	25,7	25,2
	Bias	0,3	0,9	178,5 *	4,5 *	36,4 *
<i>PhotoAP</i>	RMSE%	10,6	13,5	65,3	37,9	36,2
	Bias	0,3	0,5	617,1 *	7,2 *	50,5 *
<i>SegAP</i>	RMSE%	29,5	33,0	61,4	42,3	39,6
	Bias	3,6 *	4,9 *	577,4 *	8,5 *	54,9 *
<i>SegALS</i>	RMSE%	15,8	18,0	57,7	30,0	27,5
	Bias	0,6	1,1 *	464,8 *	3,2 *	2,8
<i>PhdAls</i>	RMSE%	10,7	13,4	35,1	15,7	17,8
	Bias	-0,7 *	-0,3	-149,0 *	-0,9	-7,2

¹ puuston keskipituus; ² pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta; ³ runkoluku; ⁴ pohjapinta-ala; ⁵ kokonaistilavuus



Kuva 3. Puuston tilavuusestimaattien keskivirheet kehitysluokittain Hänniskylän testialueella.



Kuva 4. Puuston tilavuusestimaattien keskivirheet kehitysluokittain Rajakylän testialueella.

Taulukko 5. Puulajiluokittaisten tilavuusestimaattien ja puulajiosuuksien luotettavuus suhteessa mitattuun aineistoon. RMSE% = suhteellinen keskivirhe, Bias = harha. Menetelmät, ks. Luku 3. Harhan tilastollinen merkitsevyys ($p < 0,05$) on osoitettu *-merkillä.

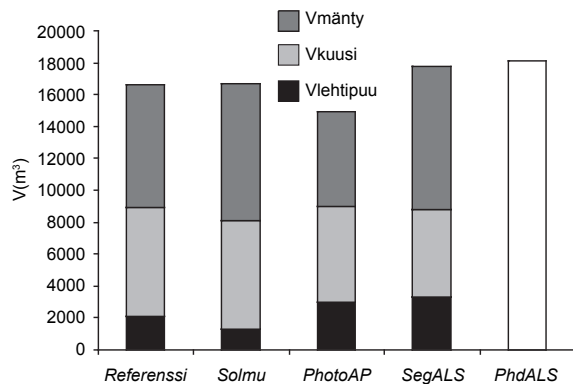
Testialue ja menetelmä	Tunnusluku	V _{määntä} ¹	V _{kuusi} ¹	V _{lehtipuu} ¹	P _{määntä} ²	P _{kuusi} ²	P _{lehtipuu} ²
HÄNNISKYLÄ							
Solmu	RMSE%	55,3	56,3	81,4	24,3	28,2	79,2
	Bias	-7,2	-2,3	8,8 *	-0,03	-0,03	0,06 *
PhotoAP	RMSE%	82,9	87,8	160,5	75,4	66,0	150,0
	Bias	14,9	13,1	-9,9	0,03	0,02	-0,05
SegALS	RMSE%	84,7	91,1	110,5	65,2	58,6	114,6
	Bias	-14,8	17,4 *	-11,4 *	-0,02	0,09 *	-0,07 *
RAJAKYLÄ							
Solmu	RMSE%	37,5	40,1	60,9	31,9	25,0	56,5
	Bias	6,9	17,3 *	12,3 *	-0,03 *	0,00	0,03 *
PhotoAP	RMSE%	81,2	72,6	85,1	80,4	65,2	72,1
	Bias	21,6 *	8,7	20,2 *	0,00	-0,08	0,07 *
SegALS	RMSE%	70,3	51,6	77,8	51,4	38,9	58,0
	Bias	-12,5	19,0 *	-3,9	-0,03	0,04	-0,01

¹ puulajiluokittainen puuston tilavuus; ² puulajiluokkien osuudet kokonaistilavuudesta

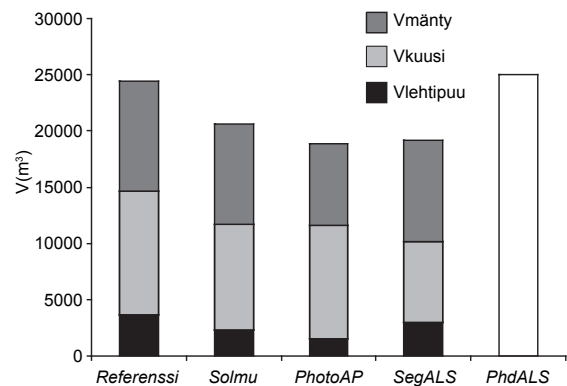
Metsikön puuston kokonaistilavuuden suhteellinen keskivirhe oli sitä pienempi mitä varttuneempi puusto on kyseessä (kuvat 3 ja 4). Tämä on luonnollinen trendi, joka johtuu osittain siitä, että sama absoluuttinen virhe on suhteellisesti sitä suurempi mitä pienempi metsikön puuston tilavuus on. Tästä trendistä oli tuloksissa nähtävissä myös poikkeuksia, mm. SegAP-menetelmällä Rajakylän testialueella.

Puulajiluokittaisten tilavuusestimaattien luotettavuus on esitetty taulukossa 5. Koska puuston ko-

konaistilavuuden estimaatin luotettavuus vaikuttaa puulajiluokittaisten tilavuusestimaattien luotettavuuteen, tarkasteltiin myös puulajisuhteiden ennustamisen luotettavuutta. Molemmat tunnuksat, puulajiluokittaiset tilavuudet ja puulajiluokkien osuudet puuston kokonaistilavuudesta, ovat vaikeita tunnuksia arvioitavaksi myös maastossa, eikä niiden ennustaminen onnistunut hyvin testatuilla kaukokartoitusmenetelmillä. Puulajiluokittaisten puustotunnusten tuottaminen kaukokartoitusmene-



Kuva 5. Hänniskylän testialueen tarkistusmitattujen kuvioiden puuston tilavuusestimaattien summa eri menetelmillä. Kokonaispinta-ala 106,6 hehtaaria.



Kuva 6. Rajakylän testialueen tarkistusmitattujen kuvioiden puuston tilavuusestimaattien summa eri menetelmillä. Kokonaispinta-ala 108,0 hehtaaria.

telmin on haasteellinen tehtävä, joka tulisi ratkaista lähitulevaisuudessa.

”Suuralueen” puuston kokonaistilavuus yliarvioitiin Hänniskylän testialueella 9%:lla *PhdALS*-menetelmällä ja 7%:lla *SegALS*-menetelmällä (kuva 5). *PhotoAP*-menetelmä tuotti kokonaispuuston tilavuudessa 10%:n aliarvion. *Solmu*-maastoinventointi tuotti hyvin tarkan kokonaistilavuuden arvion suhteessa tarkistusmittausaineistoon.

Rajakylän testialueella kaikki muut menetelmät *PhdALS*-menetelmää lukuun ottamatta aliarvioivat huomattavasti puuston kokonaistilavuuden (Kuva 6). Aliarviot vaihtelivat 16%:n ja 23%:n välillä. *PhdALS*-menetelmän tuottama yliarvio oli pieni, vain 2% suhteessa tarkistusmitattuun aineistoon.

5 Tulosten tarkastelu

Testatuista kaukokartoitusmenetelmistä luotettavimmat estimaatit metsikön kokonaispuuston puustotunnuksille saatiin *PhdALS*-menetelmällä. Menetelmä on erittäin robusti antaen luotettavia tuloksia hyvin erilaisissa metsiköissä. Tässä tutkimuksessa sovelletut regressiomallit oli tuotettu erillisestä mallinnusaineistosta, mutta jos mallit olisi tehty tämän tutkimuksen testialueiden laserkeilainaineistosta, tulokset olisivat todennäköisesti olleet vielä parempia. Lisäksi koalatasolla laadittuja malleja sovellettiin

suoraan pinta-alaltaan laajemmalla kuviolla tässä tutkimuksessa. Mallinnusaineistossa sovelletut sekä koalatasolta kuviotasolle summatut mallit tuottivat esimerkiksi puuston kokonaistilavuudelle alle 10%:n metsikkökohtaisia suhteellisia keskivirheitä (Suvanto ym. 2005, Maltamo ym. 2006).

PhdALS tuottaa erittäin luotettavia tuloksia verrattuna perinteisten optisten kaukokartoitusmateriaalien tulkintaan, ja mallit ovat todennäköisesti aika laajalle siirrettävissä, ja siten menetelmä vaatii tuekseen varsin vähän maastotyötä. Toisaalta harhan mahdollisuus kasvaa siirryttäessä maantieteellisesti kauemmas mallitusaineistosta. Tässäkin tutkimuksessa harha oli useiden muuttujien suhteen tilastollisesti merkitsevä. Menetelmän sovellettavuuteen vaikuttaa myös esimerkiksi laserkeilaimen tekniset asetukset, keilausajankohta (vuodenaika) ja keilaintyyppin vaihdokset eri vuosien välillä. Näilläkin tekijöillä ei kuitenkaan ollut merkittävää vaikutusta tulosten luotettavuuteen. Tässä tutkimuksessa kokeiltiin erikseen myös Norjassa tehtyjä regressiomalleja (Næsset 2002b), jotka tuottivat metsikkökohtaiselle puuston tilavuudelle suhteellisia keskivirheitä välille 24–28%. Tämä vastaa keskivertomaastotyön luotettavuutta.

Tutkimuksessa oletettiin maastototuudeksi systemaattisesti kuvion sisään sijoitettujen koalojen keskiarvo. Tämä oletus ei pidä paikkaansa, sillä systemaattinen koalaverkko sisältää kuviotasolla otantavirhettä. Verrattaessa tulkintatulosta kuvio-

tasolla tähän koealoista saatuun keskiarvoon, saadaan tulkintamenetelmien tulosten luotettavuudesta positiivisempi kuva kuin koealatasolla. Tutkimuksessa haluttiin kuitenkin verrata tuloksia myös kuviointaisen arvioinnin kuviokohtaisiin tuloksiin, minkä vuoksi päädyttiin kuviokohtaiseen tarkasteluun. Lisäksi tarkistusmittauskoealojen paikannustarkkuus ei ollut riittävä luotettavaan koealakohtaiseen tarkasteluun.

PhdALS-menetelmä tuottaa sitä luotettavampia tuloksia, mitä homogeenisemmaksi puustoltaan metsikkökuvio on rajattu. Tässä tutkimusaineistossa saatiin muutamassa nuoressa metsässä suuria yliarvioita puuston tilavuuden suhteen johtuen puuston aukkoisuudesta. Jos tulkinnaissa käytettäisiin laseraineistosta tuotetulta pintamallilta ja ilmakuvulta segmentoitua pienkuviointia, tulkintatulosten luotettavuutta voitaisiin kenties parantaa entisestään.

Lehtipuuvaltaisten metsiköiden puustotunnusten estimointi laserkeilainaineistoa voi aiheuttaa ongelmia hyödynnettäessä *PhdALS*-menetelmää. Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että lehtipuuvaltaisissa metsissä menetelmä saattaa tuottaa melko suuria virheitä (Nelson ym. 2004, Næsset 2004). Næssetin (2005) mukaan erot puuston latvuston rakenteessa havu- ja lehtipuilla muuttavat laserkeilainaineistosta laskettavien tunnusten ja puustotunnusten suhdetta. Jo lehtien ja neulasten fysiologiset erot aiheuttavat muutoksia laserpulssein takaisinheijastukseen. Lisäksi lehtipuuston latvustot täyttävät puuston ylimmän kerroksen aukot tehokkaasti, kun taas havupuiden latvustot ovat enemmän kartiomaisia, mikä saattaa aiheuttaa suuria tilavuuden yliarvioita lehtipuuvaltaisissa metsiköissä (Næsset 2005). Myös tässä tutkimuksessa havaittiin muutamia suuria yliarvioita lehtipuuvaltaisissa metsiköissä, mikä osaltaan johtui myös siitä, että mallinnusaineiston lehtipuuvaltaiset metsiköt olivat huomattavasti runsaspuustoisempia kuin alueella, johon malleja sovellettiin.

Tässä tutkimuksessa testatut puulajitulkinnan menetelmät, eli automaattinen sävyarvoihin perustuva puulajitulkinta (sovellettiin *SegALS*- ja *SegAP*-menetelmissä) tai visuaalinen puulajitulkinta ilmakuvilta (sovellettiin *PhotoAP*-menetelmässä) eivät tuottaneet käytännön metsäsuunnittelun tarpeisiin riittävän luotettavia tuloksia. Toisaalta digitaalisten ilmakuvien yksinpuintulkinnan käyttökelpoisuus

voi parantua lähitulevaisuudessa (esim. Olofsson ym. 2006). Myös *PhdALS*-menetelmän heikkous on puulajiluokittaisten puustotunnusestimaattien puuttuminen. Ennen kuin menetelmää voidaan soveltaa käytännön metsävaratiedon keruussa, siihen on yhdistettävä optiselta kaukokartoitusmateriaalilta tehtävä puulajitulkinta. Packalénin ja Maltamon (2006) tutkimuksessa onkin jo esitetty menetelmä puulajikohtaisten tilavuuksien tuottamisesta laserkeilainaineiston ja digitaalisen ilmakuvan avulla. Saatua tulosten tarkkuutta ei voi suoraan verrata tähän tutkimukseen, sillä tarkastelut tehtiin vain koealatasolla. Vaikuttaa kuitenkin siltä että menetelmällä saadaan vähintään yhtä luotettavia puulajikohtaisia tuloksia kuin nykyisellä maastoinventoinnilla (*Solmu*). Packalénin ja Maltamon (2006) kehittämällä laseraineiston korkeuspisteisiin ja ilmakuvan sävyarvo- ja tekstuuritunnuksiin perustuvalla lähestymistavalla saadaan tuotettua myös muut puustotunnukset vastaavasti kuin tilavuus.

Tulevaisuudessa metsäteollisuuden puunhankinnan tarpeisiin on todennäköisesti tarvetta tuottaa nykyistä tarkempaa tietoa metsikön puutavaralajijakauman ja puuston laadun arvioimiseksi. Tämä saattaa edellyttää metsikön vallitsevien latvuskerrosten puuston yksinpuintulkintaa, jotta voidaan tuottaa nykyistä luotettavampi estimaatti puuston läpimittajakaumasta. Täytyy kuitenkin muistaa, että 3D-aineistojen yksinpuintulkinta tuottaa puuston pituusjakauman, jonka jälkeen läpimitta on erikseen ennustettava mallipohjaisesti (esim. Kalliovirta ja Tokola 2005). Tavoiteltava tiedon tarkkuuden taso ylittää sen, mitä tässä tutkimuksessa voitiin osoittaa yksinpuintulkintamenetelmillä (*PhotoAP*, *SegAP* ja *SegALS*).

Käytännön sovelluksia varten menetelmävertailussa tulee ottaa huomioon tulosten luotettavuuden lisäksi eri lähestymistapojen kustannukset ja menetelmien tuottavuus. Aineistokustannukset ovat pienimmät *SegAP*-menetelmää sovellettaessa, koska menetelmä ei vaadi lähtöaineistoksi kuin numeeriset ilmakuvat 1:20000 tai tätä suuremmassa mittakaavassa. *PhotoAP*-menetelmä vaatii ilmakuvien lisäksi tuekseen ainakin kerran kerättävän harvapulsseen laserkeilainaineiston, josta voidaan tuottaa alueelle tarkka maastomalli. Ilmakuvakustannukset nykytuotoisessa metsäsuunnittelussa, jossa hyödynnetään skannattuja vääräväri-ortokuvia, ovat olleet n.

0,1 €/ha. Suurempimittakaavaisten ilmakuvien käyttö nostaisi näitä kustannuksia hieman. Laserkeilainaineistoon perustuvien menetelmien aineistokustannukset ovat huomattavasti suuremmat verrattuna edellä mainittuihin pelkkään ilmakuva-aineistoon pohjautuviin menetelmiin. Tämä aineistokustannus ei kuitenkaan enää näyttäisi olevan käytännön sovellusten esteenä, sillä tarvittava harvapulssinen laserkeilainaineisto on hankittavissa laajoille yhteisille alueilla alle 1€:lla hehtaarille.

PhotoAP oli testien mukaan erittäin työvoimavaltainen ja aikaaviepä menetelmä ja sen tuottavuus oli tässä testissä jopa huonompi kuin kattavan maastoinventoinnin. Yksinpuintulkintaan perustuvat menetelmät (SegAP ja SegALS) vaativat metsikkökohtaisen segmentointialgoritmin parametrien säätämisen, mikä huonontaa menetelmien tuottavuutta. Vaikka otetaan huomioon, että vertailussa olleet menetelmät olivat pilottitulintoja ja niiden tuottavuus todennäköisesti nousisi käytännön työssä saavutettavan ruutiinin myötä, on niiden ajanmenekki PhdALS-menetelmään verrattuna kuitenkin huomattavasti suurempi. Tämä johtuu siitä, että PhdALS-menetelmässä laskenta on täysin automaattista, joten kuviomäärä ei käytännössä juuri vaikuta ajanmenekkiin.

Tässä tutkimuksessa eri menetelmiä vertailtiin niiden tarkkuuden ja toisaalta arvioitiin kustannusten ja ajanmenekin perusteella. Tiedon tarkkuuden tasosta eri käytännön tarpeista tulisi tulevaisuudessa tehdä menetelmäkehitystä varten analyysyjä, mikä on tarvittava taso oikeisiin päätöksiin ja minkälaisia kustannuksia väärät päätökset aiheuttavat. Tällaista tutkimusta onkin jo tehty Pohjoismaissa (Holmström et al. 2003, Eid et al. 2004, Juntunen 2006).

Tulevaisuuden metsävaratietojen keruu- ja ylläpito sisältää todennäköisesti kirjon erilaisia sovellettavia menetelmiä, kuten kaukokartoitusperusteinen inventointi yhdistettynä kevennettyyn maastoinventointiin, sekä jatkuva ajantasaistus toimenpidetietoa ja laskennallista kasvatusta hyväksi käyttäen. Taimikoiden hoitotarpeen ja kiireellisyyden määrittäminen sekä esim. ekologisesti arvokkaiden luontokohteiden kartoitus ovat tietotarpeita, joita tuskin lähitulevaisuudessa pystytään tyydyttämään kaukokartoituksen keinoin. Uudessa metsävaratiedon keruumenetelmässä tämän kaltaiset kohteet tuleekin edelleen tarkistaa maastoinventoinnein. Uuden metsävaratietojärjestelmän tulee olla riittävän joustava,

jotta se pystyy hyödyntämään eri tietolähteistä ja erilaisilla tiedonkeruumenetelmillä hankittua vaihtelevan laatuista metsäsuunnittelussa sovellettavaa paikkatietoa.

Metsävaratiedon keruun ja metsäsuunnittelun menetelmien kehittämisellä pyritään metsäsuunnittelun vaikuttavuuden lisäämiseen, eli siihen, että metsänomistajat pystyvät tekemään päätöksiä metsäomaisuutensa hoitoon ja käyttöön liittyen tiedostaen kaikki tuotantokelijöiden mahdollistamat vaihtoehdot. Kun metsävaratietojen keruuseen kehitetään tehokkaampia menetelmiä, metsäammattilaiset voivat metsäsuunnittelussa keskittyä metsänomistajan tarpeiden kartoitukseen, metsänomistajan tavoitteista lähtevän toimenpideohjelman työstämiseen ja metsänomistajan neuvontaan metsän mittaamisen sijaan. Metsänomistajan henkilökohtaisen neuvonnan lisäämiselle on olemassa tunnistettu tarve (Karppinen ym. 2002) ja metsänomistajakunnan muutosten myötä tämä tarve kasvaa edelleen tulevaisuudessa.

Kiitokset

Tätä tutkimusta ovat rahoittaneet Tekes, Maa- ja metsätalousministeriö ja Metsäkeskukset. Kiitokset Tarmo Juurikkamäelle, Jukka Hoppulalle ja Rauno Salmiselle Keski-Suomen metsäkeskuksesta sekä Kimmo Kortelaiselle ja Jari Jordanille Kaakkois-Suomen metsäkeskuksesta maastoaineiston keruusta ja aineistojen laskennassa avustamisesta. Kirjoittajat haluavat myös kiittää kahta esitarkastajaa ja Metsätieteellisen aikakauskirjan toimitusta asiantuntevista kommentteista ja muutosehdotuksista käsikirjoitukseen liittyen.

Kirjallisuus

Astola, H., Bounsaythip, C., Ahola, J., Häme, T., Parmes, E., Sirro, L. & Veikkanen, B. 2004. Highforest – Forest parameter estimation from high resolution remote sensing data, Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Twentieth Congress, 12–23 July 2004, Istanbul, Turkey. s. 355–340.

- Brandtberg, T. 1999. Automatic individual tree based analysis of high spatial resolution aerial images on naturally regenerated boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1464–1478.
- Cajander, A.K. 1926. The theory of forest types. *Acta Forestalia Fennica* 29. 108 s.
- Del Frate, F. & Solimini, D. 2004. On neural network algorithms for retrieving forest biomass from SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42: 24–34.
- Dralle, K. 1997. Locating trees by digital image processing of aerial photographs. PhD thesis. Danish Forest and Landscape Research Institute and Dept. of Mathematics, The Royal Veterinary and Agricultural University, Denmark.
- Eid, T., Gobakken, T. & Næsset, E. 2004. Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 512–523.
- Franco-Lopez, H., Ek, A.R. & Bauer, M.E. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-nearest neighbour method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251–274.
- Haara, A. & Korhonen, K.T. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Halme, M. & Tomppo, E. 2001. Improving the accuracy of multisource forest inventory estimates by reducing the plot location error – a multicriteria approach. *Remote Sensing of Environment* 78: 321–327.
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 543–553.
- , Joyce, S., Nilsson, M. & Olsson, H. 2000. Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 103–111.
- Holmström, H., Kallur, H. & Ståhl, G. 2003. Cost-plus-loss analyses of forest inventory strategies based on kNN-assigned reference sample plot data. *Silva Fennica* 37(3): 381–398.
- Hyvönen, P. 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi k-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat-satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 363–379.
- Hyypä, J., Hyypä, H. & Samberg, A. 1999. Assessing forest stand attributes by laser scanner. *Laser Radar Technology and Applications IV (3707)*: 57–69.
- , Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y.-H. 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128: 109–120.
- , Kelle, O., Lehtikainen, M. & Inkinen, M. 2001. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 69–975.
- Inkinen, M. 1997. The applicability of digital aerial photographs and radar-derived stand profiles to the estimation of standwise characteristics. Thesis for Masters Degree, Helsinki University of Technology, Finland.
- Juntunen, R. 2006. Puustotiedon laadun vaikutus metsänkäsittelyn optimoinnin tuloksiin – UPM Metsän laserkeilausaineiston ja kuviotiedon vertailu. Pro gradu. Helsingin yliopisto. 76 s.
- Kalliovirta, J. & Tokola, T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39: 227–248.
- Karppinen, H., Hänninen, H. & Ripatti, P. 2002. Suomalainen metsänomistaja 2000. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 852.
- Kayitakire F., Hamel, C. & Defourny, P. 2006. Retrieving forest structure variables based on image texture analysis and IKONOS-2 imagery. *Remote Sensing of Environment* 102: 390–401.
- Korpela, I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica Monographs* 3. 93 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume function for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2001. Maa- ja metsätalousministeriön metsäsuunnitelustrategia 2001–2010. Työryhmämuistio MMM 2001. 13 s.
- Maltamo, M., Tokola, T. & Lehtikainen, M. 2003. Estimating stand characteristics by combining single tree pattern recognition of digital video imagery and a theoretical diameter distribution model. *Forest Science* 49: 98–109.
- , Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006. Non-parametric estimation of stem volume using laser scanning, aerial photography and stand reg-

- ister data. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 426–436.
- Metsäntutkimuslaitos. 2003. Metsätilastollinen vuosikirja. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/metsatilastollinen/vsk/index-en.htm>.
- Mette, T., Hajnsek, I., Papathanassiou, K. & Zimmermann, R. 2003. Above ground forest biomass estimation using fully polarimetric / interferometric radar data. POL-INSAR Workshop, ESA, ESRIN, Frascati, Italy, 14–16 January 2003.
- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246–253.
- 2002a. Determination of mean tree height of forest stands by means of digital photogrammetry. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 446–459.
- 2002b. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80: 88–99.
- 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- 2005. Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 98: 356–370.
- Nelson, R., Short, A. & Valenti M. 2004. Measuring biomass and carbon in Delaware using an airborne profiling lidar. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 500–511.
- Olofsson, K., Wallerman, J., Holmgren, J. & Olsson, H. 2006. Tree species discrimination using Z/I DMC imagery and template matching of single trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 21: 106–110.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2006. Predicting the volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. Hyväksytty sarjaan *Forest Science*.
- Pulliainen, J., Engdahl, M. & Hallikainen, M. 2003. Feasibility of multi-temporal interferometric SAR data for stand-level estimation of boreal forest stem volume. *Remote Sensing of Environment* 85: 397–409.
- Sii-tonen, M., Härkönen, K., Hirvelä, H. Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996. MELA Handbook 1996 Edition. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 622.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Tapio. 2005. Tapion vuositilastot 2005. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio.
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männyille, kuuselle ja koivulle. Teoksessa: Mäkelä, H. & Salminen, H. (toim.) 1991. Metsän tilaa ja muutoksia kuvaavia puu- ja puustotunnusmalleja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 398.

41 viitettä