



Aki Suvanto



Matti Maltamo



Petteri Packalén



Jyrki Kangas

Aki Suvanto, Matti Maltamo, Petteri Packalén ja Jyrki Kangas

Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella

Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka luotettavasti ilmasta käsin kerätystä harvapulssi-
sesta laserpisteaineistosta voidaan ennustaa kuviokohtaisia puustotunnuksia. Maastoaineistona
käytettiin 472 koealan puustotietoja, jotka oli mitattu 67 kasvatus- ja uudistamisvaiheen kuviolta.
Kaukokartoitusmateriaalina käytettiin laserpisteaineistoa, jonka tiheys oli keskimäärin 0,7 pulssia
neliömetrille. Tutkimusaineisto kerättiin elo–syyskuussa 2004 UPM-Kymmene Oyj:n omistamalta
tilalta Varkaudesta.

Tutkimuksessa sovelletun tilastollista mallinnusta käyttävän lähestymistavan toiminta perustuu
siihen, että regressioyhtälöillä lasketaan laserpisteaineistosta puustotunnuksia. Työssä laadittiin
malleja puustotunnusten ja laserpisteparvesta lasketun korkeusjakauman tunnusten välille koe-
alatasolla. Laadituilla regressioyhtälöillä ennustettiin metsikkökuviolle, käyttäen koko kuviolle
osuneita laserpisteitä, puuston keskiläpimitta, keskipituus, runkoluku, pohjapinta-ala ja tilavuus.
Mallit tuottivat laadinta-aineistossaan edellä mainituille puustotunnuksille seuraavat absoluuttiset ja
suhteelliset keskivirheet (RMSE): 1,9 cm (9,5%), 1,9 m (5,3%), 274 kpl/ha (18,1%), 2,0 m²/ha (8,3%),
ja 19,9 m³/ha (9,8%). Saadut tulokset ovat erittäin tarkkoja ja verrattuna SOLMU-muotoiseen
maastossa tehtävään kuvioittaiseen arviointiin selvästi tarkempia. Esitetty inventointimenetelmä
on edelleen kehitettynä erittäin lupaava vaihtoehto metsäsunnittelun metsänmittaustehtävään
Suomessa.

Avainsanat: keskivirhe, kuvioittainen arviointi, lidar, regressiomalli

Yhteystiedot: Suvanto, Maltamo & Packalén: Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta,

PL 111, FI-80101 Joensuu; Kangas: UPM Kymmene Metsä, PL 32, FI-37601 Valkeakoski

Sähköposti: aki.suvanto@joensuu.fi

Hyväksytty 25.11.2005

I Johdanto

Suomessa lähes kaikkien metsänomistajaryhmien metsäalueita inventoidaan metsäsuunnittelua varten kuvioittaisella arvioinnilla. Menetelmän tuottama informaatio on keskimäärin 5–10 vuotta vanhaa ja vuosittain inventoidaan noin miljoona hehtaaria jo pelkästään yksityisten metsänomistajien metsiä. Kuvioittaisen arvioinnin kehittämiseen on viime vuosina kohdistunut runsaasti tutkimusta, sillä nykymuodossaan menetelmä on verrattain kallis. Arvioitujen puustoestimaattien tarkkuus ei myöskään ole nykyisiin tarpeisiin nähden riittävä. Aiempien tutkimusten mukaan esim. kuviokohtainen puuston kokonaistilavuus voidaan ennustaa n. 15–30 % keski- virheellä (esim. Haara ja Korhonen 2004).

Kaukokartoitukseen pohjautuvaa kuvioittaisen arvioinnin kehittämistä on Suomessa tutkittu voimakkaasti viime vuosina (esim. Anttila 2002a, Anttila 2002b, Anttila ja Lehikoinen 2002, Hyvönen 2002, Maltamo ym. 2003). Keskiresoluutioisten satelliittikuvien hyödyntämistä on heikentänyt heijastukseen liittyvä saturaatio-ongelma (esim. Nilson ja Peterson 1994). Ilmakuvien tekninen laatu on puolestaan ollut vaihteleva.

Laserkeilain (LiDAR, Light Detection And Ranging; ALS, Airborne Laser Scanning) on optiseen kaukokartoitukseen verrattuna uusi menetelmä (esim. Wehr ja Lohr 1999). Koska aineistokustannukset ovat laskeneet ja menetelmällä saadaan erittäin tarkkoja tuloksia, sen käyttö metsävaratiedon tuottamisessa on yleistynyt voimakkaasti 2000-luvulla. Laserkeilaimen toiminta perustuu siihen, että lentävässä aluksessa oleva ilmaisinoso tallentaa ja tulkitsee vastaanotetun signaalin sekä määrittää sen perusteella etäisyyden mitattavaan kohteeseen (Wehr ja Lohr 1999, St-Onge ym. 2003). Koska laserkeilaimen paikka määritetään tarkasti keilaushetkellä, voidaan yksittäisten laserpulssien koordinaatit muuntaa korkeushavainnoiksi (XYZ) maanpäällisissä koordinaattijärjestelmissä. Laserkeilausperiaatteita sekä laserinstrumentteja on useita erilaisia. Mitattua laserpisteaineistoa kuvataan yleensä pulssitiheydellä, joka ilmoitetaan laserpulssien lukumääränä per neliometri maanpinnalla. Laserkeilauksen vahvuus verrattuna optisiin kaukokartoitusmenetelmiin on, että sen avulla pystytään tuottamaan kolmiulotteista

tietoa mitattavasta kohteesta (esim. Baltsavias 1999, Lim ym. 2003b). Tällöin esimerkiksi puuston järeydessä tapahtuvat muutokset pystytään tulkitsemaan tarkemmin.

Ilmasta käsin tapahtuvassa laserkeilauksessa on tällä hetkellä olemassa kaksi erillistä tekniikkaa puustotietojen tuottamiseen: yksinpuintulkinta ja tilastollisiin riippuvuussuhteisiin perustuva regressiolähestymistapa, jossa ennustetaan puustotunnuksia koealalle tai kuviolle. Laserkeilaimen tuottamasta pistemäisestä korkeustiedosta voidaan muodostaa jatkuvia pintamalleja, kuten maaston pintamalli (DTM, Digital Terrain Model) tai puiden pituutta kuvaavia pintamalleja (CHM, Canopy Height Model), joita käytetään yksittäisten puiden tunnistamisessa (esim. Hyypä ja Inkinen 1999, Persson ym. 2002). Pistemäistä aineistoa voidaan käyttää suoraan puustotunnusten tuottamisessa regressiomallien avulla (esim. Lim ym. 2003a, Næsset 2002, 2004). Laserkeilausmenetelmillä on Pohjoismaisissa tutkimuksissa päästy 9,3–25 % keski- virheeseen puuston tilavuuden ennustamisessa (Næsset ym. 2004). Vastaavasti keski- virheet ovat olleet pohjapinta- alalle 8,6–13,2 %, runkoluvulle 14,2–74,4 %, keskiläpimitalle 5,9–20 % ja keskipituudelle 2,5–13,6 % (Næsset ym. 2004).

Suomessa on toistaiseksi tutkittu pääasiassa puuston yksinpuintulkintaa laseraineistosta (esim. Hyypä ja Inkinen 1999, Maltamo ym. 2004a,b, ks. myös Maltamo ym. 2006). Yksinpuintulkinta vaatii tiheäpulsista (> n. 5 pulssia/m²), ja toistaiseksi kallista aineistoa. Lisäksi yksittäisen puun tunnistusalgoritmit eivät pysty löytämään kuin osan puista, mikä erityisesti monijaksoisissa metsissä aiheuttaa huomattavaa virhettä tulkintaan (Pitkänen ym. 2004). Laserkeilausta ei ole toistaiseksi otettu Suomen metsätaloudessa operatiiviseen käyttöön, koska sen kustannustehokkuutta ei ole selvitetty, eikä ohjelmistoja ja työn suorittajia ole ollut.

Laserkeilauksen metsäsovelluksissa on regressiolähestymistapaa käytetty ja tutkittu erityisesti Norjassa (Næsset 1997, Næsset ja Bjerkness 2001, Næsset ja Økland 2002, Næsset 2002, 2004, Næsset ym. 2005). Regressiomenetelmän käyttöön riittää harvapulssinen (esim. yksi laserpulssi per neliometri) aineisto. Norjassa regressiomenetelmää käytetään laaja- alaisissa käytännön metsien inventoinneissa (Næsset 2004). Inventointimenetelmä sisältää myös

inventointiaineiston kuvioinnin sekä edelleen kuvioiden jakamisen kehitys- ja kasvupaikkaluokkiin ilmakuvioiden stereotyöasematulkinnan avulla (esim. Næsset 2004).

Regressiolähestymistavan perusajatuksena on käyttää regressioyhtälöitä puustotunnusten laskentaan laseraineiston tunnusten avulla. Näillä malleilla laserpisteaineistosta voidaan suoraan laskea halutun alueen, esimerkiksi kuvion puuston keskipituus tai tilavuus. Ennen kuin lähestymistapaa voidaan soveltaa, on mallinnettava kiinnostavat puustotunnukset. Tämä onkin regressiomenetelmän suurin heikkous, koska käytössä ei ole yleisiä malleja, vaan jokaisessa erillisessä tutkimuksessa on laadittu uudet mallit (esim. Næsset 2004). Syynä tähän on Næssetin (2004) mukaan ollut se, että eri tutkimuksissa laserkeilauksen pistetiheys samoin kuin maastokoealojen koko on vaihdellut. Mallien laatimista varten maastossa on mitattava sijainniltaan ja mittaustuloksiltaan tarkat koealakohtaiset puustotiedot. Puustotunnusten ennustamisen tarkkuuden parantamiseksi on mallien teko Norjassa ositettu siten, että puuston eri kehitysluokille ja kasvupaikoille tehdään omat mallit (Næsset 2004).

Laserpisteaineistosta laskettavia tunnuslukuja, joiden on todettu korreloivan puustotunnusten kanssa, ovat laserpisteiden korkeusjakaumasta lasketut prosenttipisteet sekä korkeuden keskiarvo, prosenttipisteiden tiheydet, keskihajonta ja variaatiokerroin (Magnussen ja Boudewyn 1998, Næsset 2004). Prosenttipisteet ovat alhaaltapäin laskettuja laserpisteiden korkeusjakauman arvoja, jotka kertovat, millä korkeudella tietty kumulatiivinen osuus heijastuneista pisteistä on. Edelleen selittävänä muuttujana voidaan käyttää kasvillisuusosuutta eli sitä, kuinka suuri osa mitattavan alueen laserpulsseista on heijastunut puustosta tai pensaista (korkeus esimerkiksi yli 2 metriä) suhteessa heijastuksiin maan pinnasta. Edellä mainitut tunnusluvut on norjalaisissa tutkimuksissa tuotettu käyttäen inventoitavalle alueelle muodostettua systemaattista ruudukkoa (esim. 20×20 m) laskentayksikköjen perustana.

Tämä on ensimmäinen Suomessa tehty em. regressiotekniikkaan perustuva tutkimus laserkeilaineiston hyödyntämisestä puustotunnusten ennustamisessa. Työssä sovelletaan osin samoja menetelmiä kuin Norjassa (esim. Næsset 2002, 2004). Työn tavoitteet ovat seuraavat: Laserpisteaineiston

laskentaa ja käyttöä varten laaditaan maastoaineiston perusteella erilliset regressiomallit ennustettaville puustotunnuksille. Edelleen näiden mallien luotettavuus selvitetään kuviotasolla. Lopuksi pohditaan ja analysoidaan, miten hyvin regressiotekniikka soveltuu Suomen olosuhteisiin ja miten hyviä tuloksia sillä saadaan verrattuna muihin lasertutkimuksiin ja SOLMU tietosisältöiseen kuvioittaiseen arviointiin.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Maastomittaukset

Tutkimukseen liittyvät maastotyöt tehtiin elo–syyskuussa 2004 UPM-Kymmene Oyj:n omistamalla Matalansalo-nimisellä metsätalalla. Tila sijaitsee Pohjois-Savossa, Varkauden kaupungin alueella ja sen pinta-ala on noin 1200 hehtaaria. Tila on kasvupaikoiltaan ja kehitysluokkajakaumaltaan tyypillinen Järvi-Suomessa sijaitseva metsäalue, mutta sen puusto on tilan historian takia hieman hoitamattomampaa kuin mitä metsäteollisuusyritysten tiloilla yleensä.

Laadittavien regressiomallien referenssiaineistoksi mitattiin maastokoealoja. Mitattavien kuvioiden valinta tehtiin UPM:n kuviokirjan avulla. Mitattavia kuvioita valittiin kolmesta eri kehitysluokasta: nuorista ja varttuneista kasvatusmetsistä sekä uudistuskypsistä metsiköistä. Taimikot ja pinta-alaltaan alle yhden ja yli 10 hehtaarin kuviot jätettiin otannan ulkopuolelle. Pinta-alaltaan suuret kuviot jätettiin aineiston ulkopuolelle siksi, että vähäinen koealamäärä ei olisi riittävästi kuvannut kuvion sisäistä vaihtelua.

Mittausaineistoon valittiin otannalla 67 metsikkökuvioita, joista nuoria kasvatusmetsiä oli 21, varttuneita kasvatusmetsiä 26 ja uudistuskypsiä 20. Valittujen kuvioiden pääpuulaji oli valtaosin mänty tai kuusi. Nuoren ja varttuneen kasvatusmetsän kehitysluokkiin valittiin lisäksi subjektiivisesti yksi kuvio, jonka pääpuulaji oli koivu. Kuviolle perustettiin systemaattinen ympyräkoelaverkosto. Mitattuja koealoja kertyi 472 kappaletta. Koealan piti mahtua kokonaan kuvion sisälle. Koealan keskipisteelle määritettiin X-, Y- ja Z-koordinaatit GPS-mittalait-

teen avulla. Sijainnin korjauksessa hyödynnettiin reaaliaikaista differentiaalikorjausta.

Ympyräkoealan säde oli 9,0 metriä. Koealan sisäl-
tä mitattiin kaikista yli 5 cm paksuista puista rinnan-
korkeusläpimitta sekä määritettiin puulaji, puujakso
ja puuluokka (elävä/kuollut). Jokaiselle puulajille
ja puujaksolle mitattiin arvioidun mediaanipuun pi-
tuus. Koealoilta tarkistettiin ja tarvittaessa korjattiin
kuviokirjan ilmoittama kehitysluokka, kasvupaikka
ja alaryhmä. Lukupuille laskettiin pituus Veltheimin
pituusmalleilla (Veltheim 1987), joita kalibroitiin
puulajeittain ja -jaksoittain pituuskoepuumittauk-
silla. Puiden tilavuudet laskettiin Laasasenahon
(1982) kahden selittäjän tilavuusmalleilla. Koea-
loille laskettiin puustoa kuvaavat hehtaarikohtaiset
puustotunnukset (taulukko 1) ja näistä edelleen
kuviokohtaiset puustotunnukset koealojen keskiar-
voina (taulukko 2).

Puusto oli havupuuvältaista. Mäntyvältaisten koe-
alojen osuus oli 57,1 % ja kuusivältaisten 34,1 %.
Melko suurella osalla koealoja kasvoi myös lehti-
puita, kuten koivuja, harmaaleppää ja haapaa, mutta
pääpuulajina lehtipuiden osuus koealoista oli vain
8,1 %. Kehitysluokkajakauma oli melko tasainen.
Nuorta kasvatusmetsää oli 26,9 %, varttunutta
kasvatusmetsää 42,2 % ja uudistuskypsää metsää
30,9 %. Tosin osan alun perin kuviokirjan perus-
teella valituista varttuneista kasvatusmetsistä olisi
voinut luokitella jo uudistuskypsäksi, koska puusto
oli paikoin melko vanhaa ja rakenteeltaan järeää.
Samoin osa nuorista kasvatusmetsistä oli puustol-
taan melko suurta. 48,7 % koealoista oli MT-kas-
vupaikkatyyppin metsää, 41,9 % VT-tyyppiä, 7,8 %
OMT-tyyppiä ja 1,5 % CT-tyyppiä.

2.2 Laserkeilaus

Laserkeilaus suoritettiin lentokoneella 3.8.2004 klo
22.30–01.30. Laserkeilauksen teki norjalainen Blom
Norkart Mapping AS, joka on erikoistunut opera-
tiiviseen laserkeilaukseen. Käytössä oli Optechin
ALTM 2033 laserkeilain (taulukko 3).

Laserkeilauksen lentokorkeus oli 1500 metriä
maanpinnasta ja lentonopeus 75 m/s. Avauskulma
nadiirista lentosuuntaa vastaan oli 15 astetta molem-
piin suuntiin, jolloin yhden lentolinjan leveydeksi
maastossa tuli noin 800 metriä. Lentolinjojen keski-

Taulukko 1. Yhteenveto tutkimuksessa käytettyjen
472 koealan puustotiedoista. DGM = pohjapinta-alamedia-
anipuun läpimitta, HGM = pohjapinta-alamediaanipuun
pituus, N = puuston kokonaisrunkoluku, PPA = puuston
kokonaispohjapinta-ala, V = puuston kokonaistilavuus.

| | DGM, (cm) | HGM, (m) | N, (kpl/ha) | PPA, (m ² /ha) | V, (m ³ /ha) |
|-----------|--------------|-------------|----------------|------------------------------|----------------------------|
| Min | 7,6 | 6,0 | 275,0 | 4,5 | 16,1 |
| Max | 43,6 | 30,6 | 4048,0 | 49,0 | 601,7 |
| Keskiarvo | 19,8 | 17,0 | 1506,9 | 24,7 | 203,4 |
| Hajonta | 6,5 | 5,1 | 692,3 | 8,0 | 103,5 |

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksessa käytettyjen
67 kuvion puustotiedoista.

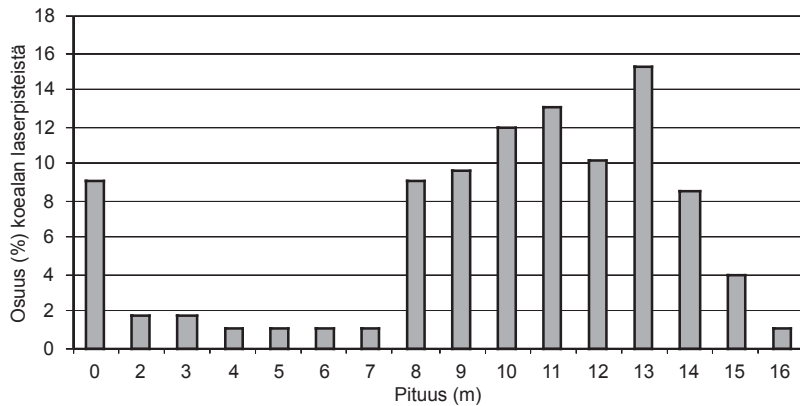
| | DGM, (cm) | HGM, (m) | N, (kpl/ha) | PPA, (m ² /ha) | V, (m ³ /ha) |
|-----------|--------------|-------------|----------------|------------------------------|----------------------------|
| Min | 10,1 | 9,2 | 576,0 | 10,9 | 49,6 |
| Max | 33,9 | 27,8 | 2993,0 | 37,4 | 415,6 |
| Keskiarvo | 19,7 | 17,0 | 1512,5 | 24,6 | 202,5 |
| Hajonta | 5,6 | 4,7 | 516,5 | 6,3 | 89,2 |

näinen sivupeitto oli 35 % ja pulssitiheys keskimää-
rin 0,7 pulssia/m². Laserpisteaineisto käsitti sekä
ensimmäisen heijastuksen (first pulse) että viimeisen
heijastuksen (last pulse), jotka olivat erillään. Laser-
pisteaineiston esikäsitteily hoiti FM-kartta Oy, jo-
ka valmisti tilan alueelta laserpisteaineistosta myös
maastomallin. Lentolinjoja oli tilan alueella kaikkia-
an seitsemän kappaletta itä–länsisuunnassa.

Laserpisteaineiston ensimmäinen käsitteilyvaihe
oli korkeuksien laskenta, joka suoritettiin vähentä-
mällä yksittäisestä laserpulssin korkeudesta maasto-
mallin korkeus. Seuraavaksi jokaisen maastokoealan
laserpisteaineisto erotettiin omaksi kokonaisuudek-
seen GIS-ohjelmistolla ja laskettiin koealakohtaiset
laserpisteiden korkeusjakaumat (kuva 1). Vastaavasti
laskettiin myös kuviokohtaiset korkeusjakaumat.

Prosenttipisteiksi valittiin 5, 10, 20, ..., 90 ja 95
arvot laserpisteiden korkeusjakaumasta.

Samoille prosenttipisteille laskettiin myös suh-
teelliset arvot eli kuinka suuri osuus pisteistä on
kertynyt kyseiseen korkeuteen mennessä. Lisäksi
laskettiin laserpisteiden maksimiarvo, keskiarvo,
keskihajonta, variaatiokerroin ja kasvillisuusosuus.
Kaikki nämä tilastolliset tunnusluvut laskettiin erik-
seen ensimmäiselle ja viimeiselle laserheijastumalle.



Kuva 1. Esimerkki koealan alueelle osuneista first pulse laserpisteistä muodostetusta korkeusjakaumasta.

Taulukko 3. ALTM 2033-laserkeilain (Laser Maps).

| | |
|----------------------------------|--|
| Lentokorkeus: | 150–2000 m |
| Vertikaalinen mittaustarkkuus: | 1200 m asti virhe alle 15 cm ja siitä 2000 m 25 cm |
| Horisontaalinen mittaustarkkuus: | Alle 1/2000 × lentokorkeus |
| Avauskulma nadiirista: | 0 ± 20 astetta |
| Lentolinjan leveys maastossa: | 0–0,68 × lentokorkeus |
| Pulssitiheys maanpinnalla: | Riippuu avauskulman suuruudesta |
| GPS-mittalaite: | Novatel Millennium |
| Keilaimen pulssintoistotaajuus: | 33 kHz |
| Laserpulssin vaihe-ero: | 0,2 mrad tai 1,0 mrad |

Tunnuksien laskentaa varten laserpisteille asetettiin myös minimikorkeusrajoite, joksi valittiin aikaisempien tutkimusten perusteella kaksi metriä (Næsset 2004). Korkeusrajoite on tarpeellinen maastomallin epätarkkuuksien takia. Kaikki valitun rajan yläpuolelle osuneet laserpisteet katsottiin olevan puustoon tai pensaisiin osuneita ja vastaavasti rajoitteen alapuolella olevat pisteet tulkittiin maaheijastumiksi. Kasvillisuusosuus, joka kuvaa metsän tiheyttä, laskettiin siten, että kaikkien yli kahden metrin korkeudelle osuneiden laserpulssien lukumäärä jaettiin koealalle tai kuviolle osuneiden laserpulssien kokonaismäärällä.

2.3 Puustotunnusten mallinnus laseraineistosta

Regressiomallit laadittiin puustotunnuksille: kokonaistilavuus, pohjapinta-ala, runkoluku sekä pohjapinta-alamediaanipuun läpimitta ja pituus. Puustotunnuksia mallinnettiin laserpisteaineistosta koealaa vastaavalle pinta-alalle lasketuilla tunnuksilla (luku 2.2). Malleja sovellettiin kuviotasolla käyttäen kuviolle osuneita laserpisteitä kuvion tunnuksen laskentaan.

Regressiomallien laadinta-aineistossa oli hierarkkinen rakenne eli metsiköstä oli mitattu useita koealoja. Tämän takia mallien laadinnassa hyödynnettiin sekamallitekniikkaa, jotta samasta metsiköstä mitattujen, keskenään korreloituneiksi oletettujen, koealojen painoarvo otettaisiin paremmin huomioon regressiokertoimia estimoitaessa (esim. Lappi 1993). Regressiomallien laadinnassa huomioitiin kaksi erillistä lähestymistapaa: Selittävinä muuttujina käytettiin laserpisteaineiston tunnuksia ja ennakkoinformaatiota, jota oletetaan saatavan vanhasta inventointitiedosta, sekä toisaalta pelkkää laserpisteinformaatiota. Valemuuttujamallien ennakkoinformaationa käytettiin kehitysluokkaa, kasvupaikkaa, pääpuulajia ja alaryhmää. Lisäksi laadittiin myös yhdistelmävalemuuttujia. Näiden valemuuttujien tarkoituksena oli luokitella mallinnusaineistoa eri osiin. Vastaavasti Næssetin (2002, 2004) artikkeleissa on tehty erilliset regressiomallit eri kehitysluokille ja kasvupaikoille.

Mallinnusta varten vastemuuttujina toimiville metsikön puustotunnuksille ja kaikille laserpisteaineistosta lasketuille selittäville muuttujille tehtiin perusmuodon lisäksi kaikkiaan neljä erillistä muunnosta: luvun toinen potenssi, neliöjuuri, luonnollinen logaritmi ja käänteislukumuunnos. Alustavien regressiomallien laadinta ja selittävien muuttujien valinta suoritettiin SPSS-tilasto-ohjelmalla. Mallit laadittiin askeltavalla regressiolla käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää. Lopulliset sekamallit laskettiin MLWin-ohjelmistolla. Mallien loogisuus varmistettiin jäännös- ja etumerkkitarasteluilla.

Regressiomallien luotettavuuden arvioinnin tunnuksina käytettiin mallin keskivirhettä (*RMSE*) ja harhaa (*b*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}} \quad (1)$$

$$b = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}) / n \quad (2)$$

Keskivirheestä ja harhasta laskettiin myös suhteelliset virheet, jolloin aritmeettisessa muodossa oleva tulos jaettiin havaitulla vastemuuttujan *y* keskiarvolla. Luotettavuutta arvioitiin tässä tutkimuksessa vain mallien laadinta-aineistossa. Mallien erillinen testaus on tehty toisessa tutkimuksessa (Uuttera *ym.* 2005).

3 Tulokset

3.1 Laaditut regressioyhtälöt ja mallien luotettavuus koelatasolla

Tässä tutkimuksessa tehdyt regressioyhtälöt olivat monimutkaisempia kuin aikaisemmissa vastaavissa lasertutkimuksissa (Næsset 2002, 2004) johtuen suuresta valemuuttujien määrästä. Kullekin puustotunnukseksi esitetään alla kaksi regressiomallia: laserpisteaineistoa ja ennakkoinformaatiota vaativa valemuuttujamalli sekä laserpisteaineistoon perustuva prosenttipistemalli. Malleissa käytetyt muuttujat on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Regressiomalleissa esiintyvien muuttujien selitykset.

| Muuttuja | Selitys |
|------------------|---|
| <i>F</i> | Laserpulssein ensimmäinen heijastuma (first pulse) |
| <i>L</i> | Laserpulssein viimeinen heijastuma (last pulse) |
| <i>vege</i> | Kasvillisuusosuus |
| <i>hmea</i> | Laserpulsseiden korkeuksista laskettu keskiarvo, m |
| <i>hajo</i> | Laserpulsseiden korkeus laskettu keskihajonta, m |
| <i>vai</i> | Laserpulsseiden korkeus laskettu variaatiokerroin |
| <i>hmax</i> | Laserpulsseiden korkeuksien maksimiarvo, m |
| <i>p05–p95</i> | 5, 10, 20, ..., 90, 95 % prosenttipisteen korkeus, m |
| <i>su05–su95</i> | Laserpulsseiden suhteellinen osuus eri prosenttipisteissä |
| <i>02</i> | Valemuuttuja nuori kasvatusmetsä |
| <i>04</i> | Valemuuttuja uudistuskypsä metsä |
| <i>ku</i> | Valemuutt. pääpuulaji kuusi |
| <i>ko</i> | Valemuutt. pääpuulaji koivu |
| <i>ks</i> | Valemuutt. kivennäismaa, jonka pääpuulaji kuusi |
| <i>kv</i> | Valemuutt. kivennäismaa, jonka pääpuulaji koivu |
| <i>su</i> | Valemuutt. korpi tai räme |
| <i>st</i> | Valemuutt. korpi tai räme, jonka pääpuulaji mänty |
| <i>sv</i> | Valemuutt. korpi tai räme, jonka pääpuulaji koivu |
| <i>om</i> | Valemuutt. OMT-kasvupaikkatyypin |
| <i>vt</i> | Valemuutt. VT-kasvupaikkatyypin |

Puuston tilavuuden valemuuttujamalli (3)

$$\begin{aligned} \ln(V) = & 1,273 + 1,395 \times \sqrt{Fvege} - 9,814 \times \frac{1}{koFp90} \\ & + 0,238 \times \sqrt{Lhmea} + 1,036 \times \sqrt{Lvege} - 2,511 \times \frac{1}{Fp10} \\ & - 0,322 \times \ln(kuFvege) - 0,575 \times \frac{1}{04Lp05} + 0,372 \times \sqrt{Lp70} \\ & - 0,002 \times (koLp20)^2 - 8,769 \times \ln(koFsu70) \\ & + 4,358 \times \ln(koLsu60) + 4,249 \times \frac{1}{ksFp10} \\ & - 6,907 \times \frac{1}{ksFhmea} + \delta^2 / 2 \end{aligned}$$

Tilavuudelle tehtiin logaritmuunnos, sillä residuaalit olivat heteroskedastiset. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiesiintymä ja satunnainen virhetermi olivat 0,00025 ja 0,02435 eli suurin osa selittämättömästä vaihtelusta oli jäännösvaihtelua. Laskettaessa malleilla, joiden selittämissä muuttujissa on muunnoksia, tuloksia on käytössä huomioitava harhattomuuskorjaus, joka on virhekomponenttien summa. Tässä tapauksessa se on $\delta^2 = 0,0246$.

Puuston pohjapinta-alan valemuuttujamalli (4)

$$\begin{aligned}\sqrt{PPA} = & -2,135 + 2,064 \times \ln(Fhmea) + 1,627 \times Fvege \\ & -0,078 \times \frac{1}{koFsu05} + 1,596 \times Lvege - 1,135 \times (04L \text{ var } i)^2 \\ & + 0,001 \times (suLp10)^2 - 0,001 \times (Lp10)^2 - 6,113 \times (stF \text{ var } i)^2 \\ & + 5,742 \times (stFsu20)^2 - 0,004 \times (02Fp70)^2 \\ & + 0,365 \times \ln(02Fp10) + \delta^2\end{aligned}$$

Pohjapinta-alan malli sisältää erilliset valemuuttajat nuorelle kasvatusmetsälle ja uudistuskypsälle metsälle, koivulle, korvelle ja rämeelle sekä jos korven tai rämeen pääpuulaji on mänty. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00734 ja 0,11368.

Puuston runkoluvun valemuuttujamalli (5)

$$\begin{aligned}\sqrt{N} = & 35,386 + 11,775 \times (Fvege)^2 - 0,041 \times (Lhmea)^2 \\ & + 18,081 \times (Lvege)^2 + 2,260 \times \frac{1}{suF \text{ var } i} - 0,077 \times (omLhajo)^2 \\ & - 0,056 \times (kuFp40)^2 + 0,032 \times (kuFp80)^2 - 49,980 \times \frac{1}{Fp10} \\ & - 43,191 \times \frac{1}{svLhajo} + 51,533 \times svF \text{ var } i - 0,019 \times (suFp80)^2 \\ & + 0,288 \times (vtFhajo)^2 - 58,382 \times \frac{1}{stFp40} + 0,150 \times (stLp95)^2 \\ & - 0,138 \times (stFp95)^2 + 78,037 \times \frac{1}{02Fp70} \\ & - 0,158 \times (vtLhajo)^2 + \delta^2\end{aligned}$$

Puuston runkoluvun laskennassa käytettävä regressiomalli on rakenteeltaan melko pitkä ja monimutkainen sisältäen kaikkiaan 13 erillistä valemuuttujaa. Tämän takia selittävien muuttujien välistä keskinäistä vaikutusta onkin vaikea hahmottaa. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 3,64228 ja 12,25199.

Puuston keskipituuden valemuuttujamalli (6)

$$\begin{aligned}HGM = & 5,910 + 0,499 \times Fp80 - 0,003 \times (02Fp90)^2 \\ & + 0,016 \times (Fp60)^2 - 14,210 \times \frac{1}{04Lh \text{ max}} + 0,029 \times (kuFhajo)^2 \\ & - 8,469 \times \frac{1}{02Lp40} + 1,338 \times (omLvege)^2\end{aligned}$$

Puuston keskipituuden regressioyhtälö on lyhin valemuuttujamalleista. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00000 ja 1,79860.

Puuston keskiläpimitan valemuuttujamalli (7)

$$\begin{aligned}\sqrt{DGM} = & 3,401 + 0,070 \times Fp80 - 0,001 \times (02Fp90)^2 \\ & - 0,037 \times koFp10 + 0,040 \times omFhajo - 0,159 \times Fp20 \\ & + 0,094 \times Lp40 - 6,138 \times \frac{1}{04Lp20} - 0,694 \times \frac{1}{04Fvege} \\ & - 1,461 \times \frac{1}{02Fp05} + 0,002 \times (Fp50)^2 + 0,010 \times (suFhajo)^2 \\ & + 3,834 \times \ln(suFsu95) + 1,416 \times (04Lvege)^2 \\ & - 2,138 \times (04Fvege)^2 + 1,681 \times \frac{1}{04Fsu70} + \delta^2\end{aligned}$$

Keskiläpimitan valemuuttujamalli sisältää useita uudistuskypsään metsään liittyviä valemuuttujia. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00224 ja 0,05088.

Puuston tilavuuden prosenttipistemalli (8)

$$\begin{aligned}\ln(V) = & 0,788 + 0,704 \times \ln(Fp50) + 1,090 \times \sqrt{Fvege} \\ & + 0,735 \times \ln(Lhmea) + 0,267 \times \ln(Lvege) + \delta^2 / 2\end{aligned}$$

Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00781 ja 0,02887.

Puuston pohjapinta-alan prosenttipistemalli (9)

$$\sqrt{PPA} = -0,795 + 1,329 \times \ln(Fhmea) + 1,342 \times Fvege \\ + 2,270 \times \sqrt{Lvege} - 1,773 \times \frac{1}{Fp05} + \delta^2$$

Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,02987 ja 0,13199.

Puuston runkoluvun prosenttipistemalli (10)

$$N = 11376,750 + 1556,143 \times (Lvege)^2 \\ + 1036,063 \times (Fvege)^2 - 4,214 \times (Lhmea)^2 \\ - 5777,637 \times (Fsu50)^2 - 5755,064 \times \frac{1}{Lsu70} \\ - 1471,856 \times \sqrt{Lvar}$$

Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 50364,3600 ja 116540,5000.

Puuston keskipituuden prosenttipistemalli (11)

$$\sqrt{HGM} = 0,950 + 0,594 \times \sqrt{Fp80} + 0,055 \times Fp60 + \delta^2$$

Keskipituuden prosenttipistemalli on yksinkertaisin ja lyhin. Se sisältää vain kaksi prosenttipistettä ja mallin vakiotermin. Kuvioiden välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00157 ja 0,02877.

Puuston keskiläpimitan prosenttipistemalli (12)

$$\ln(DGM) = 2,970 + 0,440 \times \sqrt{Lp70} - 0,383 \times \sqrt{Fp20} \\ - 0,337 \times (Fvege)^2 + 0,409 \times \sqrt{Fp50} - 1,900 \times \sqrt{Lsu70} \\ - 0,052 \times \frac{1}{Lvege} + \delta^2 / 2$$

Puuston keskiläpimitan ennustamisessa tarkimman lopputuloksen tuotti luonnolliseen logaritmi-muunnokseen perustuva prosenttipistemalli. Malli koostuu kolmesta prosenttipistemallista, yhdestä suhteellista osuutta kuvaavasta muuttujasta ja kahdesta kasvillisuusosuusmuuttujasta. Kuvioiden

välistä vaihtelua kuvaavan satunnaismuuttujan varianssiestimaatti ja satunnainen virhetermi olivat 0,00325 ja 0,01452.

Valemuuttuja- ja prosenttipistemallien luotettavuus koealatasolla on esitetty taulukoissa 5 ja 6. Esimerkiksi tilavuuden osalta keskivirhe oli 17,3 ja 19,9 % em. malleilla. Valemuuttujamallit tuottivat yleensä 1–3 %-yksikköä pienempiä suhteellisia keskivirheitä paitsi keskiläpimitan kohdalla. Mallit olivat lähes harhattomia takaisinpalautetussa aritmeettisessa muodossaan laadinta-aineistossaan. Tarkkuudeltaan tulokset ovat vertailukelpoisia Pohjoismaissa aikaisemmin saatuihin koealatason tuloksiin mallitusaineistossa (esim. Næset ym. 2004). Valemuuttujamallien keskinäistä toimivuutta tarkasteltiin myös laskemalla maastoaineiston ja mallien avulla koealakohtaiset muotoluvut. Muutamaa koealaa lukunnottamatta tulokset olivat loogisia, mutta ennustetut muotoluvut olivat keskimäärin lieviä aliarvioita (n. 5 %).

3.2 Kuviokohtaiset tulokset

Taulukoissa 7 ja 8 on esitetty kuvioaineistosta valemuuttuja- ja prosenttipistemalleilla lasketut hehtarikohtaisten puustotunnusten luotettavuustunnukset. Molemmat mallityypit antoivat liki saman tarkkuuden. Esimerkiksi suhteelliset keskivirheet ovat 2,5 prosenttiyksikön sisällä. Prosenttipistemallit tuottivat tarkemman tarkkuuden keskiläpimitalle ja keskipituudelle. Molempien mallityyppien tulokset olivat lähes harhattomia, lukuun ottamatta puuston runkolukua ja tilavuutta. Kuviokohtainen tilavuuden suhteellinen keskivirhe jäi valemuuttujamallilla alle 10 %:n. Kaikkien estimoitujen kuviotunnusten tarkkuus oli parempi kuin mitä SOLMU-tietosisältöisellä kuvioittaisella arvioinnilla on saatu (taulukko 8, Haara ja Korhonen 2004). Valemuuttujamallit tuottivat puuston tilavuudelle ja runkoluvulle aliarvion ja muille tunnuksille yliarvion. Prosenttipistemallit käyttäytyivät muuten samalla tavalla, mutta myös puuston pohjapinta-ala oli aliarvio.

Kuvioaineistosta laskettiin luotettavuustuloksia myös ositteittain (taulukot 9–12). Kyseisissä laskuissa käytettiin malleja, jotka olivat tarkimpia keskivirheellä mitaten kuviotasolla (taulukot 7 ja 8). Ositus tehtiin kehitysluokan, kasvupaikan,

Taulukko 5. Valemuetujamallien luotettavuus koealatasolla. N = 472. Mallit 3–7.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| V (m ³ /ha) | 203,4 | 103,5 | 35,1 | 17,3 | -1,3 | -0,6 |
| PPA (m ² /ha) | 24,7 | 8,0 | 3,6 | 14,6 | -0,3 | -1,2 |
| N (kpl/ha) | 1506,9 | 692,3 | 317,2 | 21,1 | 5,4 | 0,4 |
| HGM (m) | 17,0 | 5,1 | 1,3 | 7,9 | -0,1 | -0,6 |
| DGM (cm) | 19,8 | 6,5 | 4,7 | 23,8 | 0,1 | 0,4 |

Taulukko 6. Prosenttipistemallien luotettavuus koealatasolla. N = 472. Mallit 8–12.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| V (m ³ /ha) | 203,4 | 103,5 | 40,4 | 19,9 | -0,2 | -0,1 |
| PPA (m ² /ha) | 24,7 | 8,0 | 4,1 | 16,5 | 0,0 | -0,1 |
| N (kpl/ha) | 1506,9 | 692,3 | 407,6 | 27,0 | -6,4 | -0,4 |
| HGM (m) | 17,0 | 5,1 | 1,4 | 8,4 | 0,0 | -0,1 |
| DGM (cm) | 19,8 | 6,5 | 2,7 | 13,6 | 0,1 | 0,6 |

Taulukko 7. Valemuetujamallien luotettavuus kuviotasolla. N = 67. Mallit 3–7.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| V (m ³ /ha) | 202,5 | 89,2 | 19,9 | 9,8 | 1,8 | 0,9 |
| PPA (m ² /ha) | 24,6 | 6,3 | 2,0 | 8,3 | -0,1 | -0,4 |
| N (kpl/ha) | 1512,5 | 516,5 | 273,8 | 18,1 | 36,9 | 2,4 |
| HGM (m) | 17,0 | 4,7 | 0,9 | 5,4 | -0,4 | -2,4 |
| DGM (cm) | 19,7 | 5,6 | 2,0 | 9,9 | -0,8 | -4,0 |

Taulukko 8. Prosenttipistemallien luotettavuus kuviotasolla. N = 67. Mallit 8–12. Taulukossa on esitetty myös puustotunnusten suhteelliset RMSE:t kuviotasolla Kankaan ym. (2002) sekä Haaran ja Korhosen (2004) tutkimuksista.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) | Kangas ym. (2002) | Haara ja Korhonen (2004) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|-------------------|--------------------------|
| V (m ³ /ha) | 202,5 | 89,2 | 24,1 | 11,9 | 4,7 | 2,3 | | 24,8 |
| PPA (m ² /ha) | 24,6 | 6,3 | 2,6 | 10,5 | 0,2 | 0,9 | 31,8 | 19,6 |
| N (kpl/ha) | 1512,5 | 516,5 | 312,0 | 20,6 | 53,0 | 3,5 | 80,6 | |
| HGM (m) | 17,0 | 4,7 | 0,9 | 5,3 | -0,3 | -1,8 | 19,6 | 15,7 |
| DGM (cm) | 19,7 | 5,6 | 1,9 | 9,5 | -0,6 | -2,9 | 15,4 | 12,6 |

pääpuulajin ja alaryhmän mukaan. Taulukoissa on esitetty lukumäärät kuhunkin luokkaan kuuluvista kuvioista. Taulukossa 9 on esitetty tulokset kehitysluokittain. Tilavuuden suhteellinen keskivirhe oli suurin nuorissa kasvatusmetsissä, ja pienin varttuneissa kasvatusmetsissä. Regressiomallit tuottivat nuorissa kasvatusmetsissä ja uudistuskypsissä metsissä puuston tilavuudelle aliarvion ja varttuneissa kasvatusmetsissä yliarvion. Puuston runkoluvun

suhteellinen keskivirhe käyttäytyi päinvastoin kuin tilavuuden virhe. Mallit tuottivat runkoluvulle yliarvion nuorena kasvatusmetsässä ja aliarvion muissa kehitysluokissa. Muilla puustotunnuksilla tarkimmat tulokset saatiin uudistuskypsässä metsässä ja huonoimmat nuorena kasvatusmetsässä.

VT-kasvupaikkatyypillä on pienin tilavuuden, keskiläpimitan ja runkoluvun suhteellinen keskivirhe (taulukko 10). OMT-kasvupaikkatyypin vertailua

Taulukko 9. Kehitysluokittain lasketut luotettavuustunnukset kuviotasolla.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|---|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| Kehitysluokka: Nuori kasvatusmetsä 17 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 109,6 | 39,8 | 13,1 | 11,9 | 1,9 | 1,8 |
| PPA (m ² /ha) | 19,1 | 5,1 | 1,9 | 9,9 | 0,1 | 0,6 |
| N (kpl/ha) | 2049,0 | 408,6 | 312,0 | 15,2 | -40,1 | -2,0 |
| HGM (m) | 11,2 | 1,5 | 1,0 | 9,3 | -0,7 | -5,9 |
| DGM (cm) | 13,2 | 1,5 | 1,6 | 12,3 | -0,6 | -4,7 |
| Kehitysluokka: Varttunut kasvatusmetsä 30 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 194,2 | 58,3 | 17,4 | 8,9 | -3,6 | -1,8 |
| PPA (m ² /ha) | 24,0 | 5,0 | 2,0 | 8,4 | -0,6 | -2,7 |
| N (kpl/ha) | 1366,0 | 419,2 | 272,0 | 20,0 | 69,0 | 5,0 |
| HGM (m) | 17,2 | 2,6 | 0,8 | 4,7 | -0,2 | -0,9 |
| DGM (cm) | 19,4 | 2,8 | 1,9 | 9,6 | -0,6 | -3,3 |
| Kehitysluokka: Uudistuskypsä metsä 20 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 293,9 | 66,8 | 27,0 | 9,2 | 9,6 | 3,3 |
| PPA (m ² /ha) | 30,3 | 4,1 | 2,2 | 7,2 | 0,6 | 1,8 |
| N (kpl/ha) | 1277,0 | 409,7 | 239,0 | 18,7 | 54,0 | 4,3 |
| HGM (m) | 21,6 | 3,3 | 0,9 | 4,2 | -0,2 | -1,1 |
| DGM (cm) | 25,8 | 4,5 | 2,1 | 8,0 | -0,5 | -1,7 |

Taulukko 10. Kasvupaikoittain lasketut luotettavuustunnukset kuviotasolla.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| Kasvupaikka: OMT, (lehtomainen kangas) 5 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 298,7 | 55,2 | 25,3 | 8,5 | 14,2 | 4,8 |
| PPA (m ² /ha) | 30,5 | 2,9 | 2,1 | 6,8 | 1,3 | 4,3 |
| N (kpl/ha) | 1264,0 | 680,3 | 350,0 | 27,7 | 143,0 | 11,3 |
| HGM (m) | 21,9 | 2,5 | 0,8 | 3,7 | 0,4 | 1,6 |
| DGM (cm) | 25,8 | 5,6 | 2,2 | 8,6 | -0,4 | -1,3 |
| Kasvupaikka: MT, (tuore kangas) 32 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 223,4 | 98,3 | 23,6 | 10,6 | 3,9 | 1,7 |
| PPA (m ² /ha) | 26,4 | 6,6 | 2,1 | 8,0 | 0,0 | 0,1 |
| N (kpl/ha) | 1618,0 | 513,6 | 287,0 | 17,7 | 4,0 | 0,3 |
| HGM (m) | 17,7 | 5,2 | 1,0 | 5,4 | -0,4 | -2,0 |
| DGM (cm) | 20,6 | 6,3 | 2,1 | 10,2 | -0,6 | -2,8 |
| Kasvupaikka: VT, (kuivahko kangas) 29 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 165,8 | 61,5 | 13,8 | 8,3 | -2,9 | -1,8 |
| PPA (m ² /ha) | 21,8 | 5,1 | 1,9 | 8,6 | -0,6 | -2,6 |
| N (kpl/ha) | 1425,0 | 482,2 | 243,0 | 17,1 | 47,0 | 3,3 |
| HGM (m) | 15,6 | 3,7 | 0,8 | 5,0 | -0,3 | -2,0 |
| DGM (cm) | 18,0 | 3,8 | 1,5 | 8,2 | -0,6 | -3,2 |

hankaloittaa aineiston vähyys. Puuston pohjapinta-alassa OMT:llä päästään pienimpään keskivirheeseen, koska osite sisältää pääasiassa uudistuskypsiä metsiköitä, joissa pohjapinta-alan regressiomalli toimii tarkimmin. MT-kasvupaikkatyyppi sisälsi

lukumääräisesti eniten ja monipuolisimpia kuvioita, joiden puustotiheydet, pääpuulajit ja kehitysluokat vaihtelivat paljon. Tästä syystä osalla lasketuista puustotunnuksista oli suurin keskivirhe juuri tässä kasvupaikkaluokassa.

Taulukko 11. Pääpuulajeittain lasketut luotettavuustunnukset kuviotasolla.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| Pääpuulaji: Mänty 41 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 176,7 | 73,2 | 15,1 | 8,6 | -0,7 | -0,4 |
| PPA (m ² /ha) | 22,8 | 5,5 | 1,9 | 8,4 | -0,4 | -1,6 |
| N (kpl/ha) | 1480,0 | 475,6 | 246,0 | 16,6 | 48,0 | 3,2 |
| HGM (m) | 15,9 | 4,2 | 0,8 | 5,2 | -0,3 | -2,0 |
| DGM (cm) | 18,5 | 4,5 | 1,6 | 8,5 | -0,5 | -2,9 |
| Pääpuulaji: Kuusi 22 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 265,4 | 84,7 | 27,3 | 10,3 | 8,7 | 3,3 |
| PPA (m ² /ha) | 29,0 | 5,3 | 2,1 | 7,4 | 0,4 | 1,4 |
| N (kpl/ha) | 1437,0 | 490,4 | 276,0 | 19,2 | 41,0 | 2,8 |
| HGM (m) | 19,7 | 4,5 | 1,0 | 5,0 | -0,2 | -0,9 |
| DGM (cm) | 23,4 | 5,9 | 2,2 | 9,3 | -0,3 | -1,4 |
| Pääpuulaji: Koivu 4 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 120,0 | 77,4 | 13,3 | 11,1 | -11,4 | -9,5 |
| PPA (m ² /ha) | 19,2 | 8,3 | 2,5 | 13,0 | 0,0 | -0,2 |
| N (kpl/ha) | 2256,0 | 616,0 | 468,0 | 20,7 | -99,0 | -4,4 |
| HGM (m) | 12,7 | 4,0 | 1,0 | 8,0 | -0,8 | -6,1 |
| DGM (cm) | 12,7 | 2,6 | 2,6 | 20,7 | -2,5 | -20,0 |

Taulukko 12. Metsämaan alaryhmän mukaan lasketut luotettavuustunnukset kuviotasolla.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| Alaryhmä: Kivennäismaa 49 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 201,3 | 90,8 | 18,2 | 9,0 | 0,9 | 0,4 |
| PPA (m ² /ha) | 24,3 | 6,2 | 2,0 | 8,2 | -0,5 | -1,8 |
| N (kpl/ha) | 1446,0 | 495,5 | 266,0 | 18,4 | -1,0 | -0,1 |
| HGM (m) | 17,1 | 4,9 | 0,8 | 4,7 | -0,2 | -1,4 |
| DGM (cm) | 19,7 | 5,7 | 1,8 | 9,3 | -0,5 | -2,8 |
| Alaryhmä: Korpi 13 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 238,6 | 73,8 | 27,7 | 11,6 | 7,4 | 3,1 |
| PPA (m ² /ha) | 28,3 | 4,9 | 2,4 | 8,5 | 1,1 | 3,9 |
| N (kpl/ha) | 1743,0 | 621,8 | 316,0 | 18,1 | 199,0 | 11,4 |
| HGM (m) | 18,1 | 3,6 | 1,1 | 6,0 | -0,2 | -1,3 |
| DGM (cm) | 21,2 | 5,2 | 2,1 | 9,9 | -0,5 | -2,6 |
| Alaryhmä: Rämä 5 kpl | | | | | | |
| V (m ³ /ha) | 120,2 | 56,7 | 8,5 | 7,1 | -4,5 | -3,8 |
| PPA (m ² /ha) | 17,9 | 5,2 | 1,4 | 7,9 | 0,3 | 1,7 |
| N (kpl/ha) | 1569,0 | 252,7 | 224,0 | 14,3 | -9,0 | -0,6 |
| HGM (m) | 13,2 | 3,8 | 1,2 | 9,4 | -1,1 | -8,3 |
| DGM (cm) | 16,3 | 5,1 | 1,5 | 9,0 | -1,0 | -6,3 |

Koivuvaltaisilla kuvioilla kaikkien puustotunnusten laskeminen tuotti yliarvioita maastomittauksiin verrattuna (taulukko 11). Varsinkin keskiläpimitan ennustaminen tuotti melko suuren yliarvion verrattuna havupuuvaltaisiin kuvioihin. Nämä yliarviot

aiheutuivat todennäköisesti siitä, että koivut olivat läpimitaltaan suhteessa paljon pienempiä kuin männyt ja kuuset ja mallinnusaineistossa suurin osa kuvioista oli havupuuvaltaisia. Koivun havupuista poikkeava latvuksen rakenne sekä neulasten ja lehti-

Taulukko 13. Matalansalon tilan kuviokirjan päivitettyjen puustotunnusten perusteella lasketut luotettavuustunnukset kuviotasolla.

| | Maastoaineiston keskiarvo | Maastoaineiston keskihajonta | RMSE | RMSE (%) | Harha | Harha (%) |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------|----------|-------|-----------|
| V (m ³ /ha) | 202,5 | 89,2 | 47,7 | 23,6 | 18,1 | 8,9 |
| PPA (m ² /ha) | 24,6 | 6,3 | 4,6 | 18,8 | 1,7 | 7,1 |
| N (kpl/ha) | 1512,5 | 516,5 | 725,0 | 47,9 | 487,0 | 32,2 |
| HGM (m) | 17,0 | 4,7 | 2,2 | 13,0 | 1,1 | 6,5 |
| DGM (cm) | 19,7 | 5,6 | 2,5 | 12,5 | 0,6 | 3,1 |

en välinen ero voivat edelleen vaikuttaa laserpulssien heijastumiseen latvustosta (Gaveau ja Hill 2003). Kuusen ja männyn välisissä tuloksissa on jonkin verran vaihtelua. Tilavuuden keskivirhe on pienempi männyllä, jolla malli tuottaa yliarviota. Tämä selittyi ehkä osaksi sillä, että mallinnusaineistossa mäntyjä oli eniten, ja mäntyvaltaisilla kuvioilla ei ollut niin suuria puuston tilavuuksia kuin kuusivaltaisilla kuvioilla.

Rämeillä puustotunnusten virheet olivat pienimmät lukuun ottamatta keskipituuden laskentaa, joissa mallit tuottivat selvän yliarvion (taulukko 12). Varsinkin keskipituuden regressiomallilla, jossa ei ollut mukana valemuuttujia, tulos oli huomattava yliarvio. Rämeillä kasvava puusto oli suhteessa kitukasvuista ja pienikokoista verrattuna kivennäismaan puustoihin. Tämän takia mallien tuottamat selkeät yliarviot puuston pituuksille ovat loogisia. Kivennäismailla päästään tarkimpiin tuloksiin, mutta toisaalta niitä on myös eniten mallinnusaineistossa.

Lopuksi kuviokohtaiset tulokset laskettiin myös UPM-Kymmenen Matalansalon tilan kuviokirjan perusteella (taulukko 13). Luotettavuustunnukset ovat selvästi epätarkempia kuin laserkeilausmalleilla lasketut tulokset (taulukot 7–8).

4 Tulosten tarkastelu

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset olivat verraten tarkkoja. Esimerkiksi tilavuuden suhteellinen keskivirhe oli jopa alle 10 %, ja muidenkin puustotunnusten kohdalla päästiin tarkempaan tuloksiin kuin SOLMU-tietosisältöisellä kuvioittaisella arvioinnilla (esim. Haara ja Korhonen 2004). Tutkimuksen tulokset eivät olennaisesti poikkea aikaisemmista

lasertutkimuksista. Holmgrenin (2004) tutkimuksessa saadut tulokset ovat samaa suuruusluokkaa, vaikka käytetyissä regressiomalleissa ja laskentamenetelmissä olikin eroja. Lisäksi Holmgrenin (2004) käyttämä maastoaineisto oli puustoltaan järeämpää. Edelleen norjalaisen Næssetin (2002 ja 2004) esittämät tulokset vastaavat hyvin tarkkuustasoltaan ja tuloksia voidaan verrata, koska menetelmät ja aineisto olivat hyvin samankaltaisia.

Suurin ero verrattuna muihin Pohjoismaissa tehtyihin lasertutkimuksiin oli se, että tässä tutkimuksessa ei ollut erillistä mallinnus- ja testausaineistoa. Laadittuja malleja on kuitenkin testattu erillisessä tutkimuksessa (Uuttera ym. 2005). Mallien tuottama virhe kuviotasolla on tällöin ollut suurempi kuin tässä tutkimuksessa ollen kuitenkin alle 20 % esimerkiksi kokonaistilavuuden osalta. Käytetyt testausaineistot olivat lisäksi maantieteellisesti selvästi eri alueilta (Kaakkois-Suomi ja Keski-Suomi) ja käytetyn laserkeilausaineiston pulssitiheys oli pienempi. Myös Næssetin (2002) laatimia malleja testattiin Matalansalon aineistossa. Tällöin kuviotason tilavuuden virhe oli n. 21 %. Matalansalo poikkeaa maantieteellisesti jo huomattavasti Næssetin (2002) käyttämästä aineistosta ollen yli tuhannen kilometrin päässä Norjasta. Koska saadut luotettavuusluvut ovat kuitenkin suomalaisen kuvioittaisen arvioinnin virhetoleranssin (ks. esim. Uuttera ym. 2002) rajoissa, voidaankin olettaa, että yleisellä tasolla laserkeilainaineistosta laaditut mallit eivät ole herkkiä pienille muutoksille ja niitä voidaan soveltaa varsin laajoilla alueilla. Toisaalta laadittujen mallien tarkkuutta heikentänevät myös mahdolliset muutokset laserkeilainlaitteiston kalibroinnissa sekä itse laitteistossa (keilaintyyppi, saman keilaintyyppin uusi malli). Laserkeilausmallien maantieteellinen testaus jatkuu parhaillaan Maa- ja metsätalousministeriön

rahoittamassa yhteistutkimushankkeessa ”Laserkeilaukseen perustuva puustotietojen estimointi (LAKEPEST)”.

Toinen ero muissa Pohjoismaissa laadittuihin regressiomalleihin on valemuuttujien käyttö mallien osituksessa eri kehitysluokille, kasvupaikoilla ja pääpuulajeille. Tästä johtuen nyt laaditut valemuuttujamallit ovat sängen monimutkaisia tilastollisiin riippuvuussuhteisiin perustuvia yhtälöitä. Jatkossa tulisikin selvittää, miten ennakkoinformaatio voidaan optimaalisesti yhdistää malleihin. Suomessa ennakkoinformaatiota voitaisiin käytännön soveluksissa saada vanhoista kuviotiedoista kasvupaikan ja mahdollisesti myös pääpuulajin osalta, mutta kehitysluokan arviointi kuviokirjan perusteella on jo melko epävarmaa. Tällöin mahdollisesti virheellinen ennakkoinformaatio huonontaneekin valemuuttujamallien sovellettavuutta. Periaatteessa ennakkoinformaatiota voitaisiin Norjan tavoin Suomessakin saada ilmakuvatulkinnan avulla.

Eri puustotunnusten mallit voisi laatia myös yhdenaikaisesti estimoituna simultaanisena yhtälöryhmänä. Tällainen malliryhmä ei kuitenkaan estimoitunut käytettävissä olleella ohjelmistolla. Valemuuttujamallien keskinäistä toimivuutta tarkasteltiin laskemalla koealakohtainen muotoluku. Tulokset olivat loogisia, mutta keskimäärin lieviä aliarvioita, mikä johtunee siitä, että sekä tilavuuden, pohjapinta-alan kuin keskipituudenkin valemuuttujamallissa on pieni samansuuntainen harha. Simultaanisten mallien soveltaminen parantaisi edelleen mallien keskinäistä toimivuutta.

Edelleen tämän tutkimuksen kuviotason tulosten laskenta poikkeaa teknisesti esimerkiksi Næssetin (2002 ja 2004) ja Holmgrenin (2004) käyttämästä ruudukkopohjaisesta (grid) laskentatavasta. Ruudukko-tavan etuna voidaan pitää sitä, että mallitus- ja laskentayksikkö ovat kooltaan hyvin lähellä toisiaan, kun taas kuviotason laskennassa laadittuja malleja sovelletaan huomattavasti suurempaan laskentayksikköön. Eräs mahdollisuus olisikin soveltaa lasermalleja pienkuvio- tai segmenttitasolla (esim. Pekkarinen 2002). Myös ruudukko-menetelmän soveltamista kannattaisi tutkia ja kehittää Suomessa.

Eräs tärkeä seikka, mikä esiintyy kaikissa inventointitutkimuksissa, on puustotunnusten koeala- ja kuviotason välinen ero. Siirryttäessä koealatasolta kuviotasolle puuston tilavuuden ja pohjapinta-alan

suhteelliset keskivirheet pienenevät eniten, 7,44 ja 6,31 prosenttiyksikköä. Keskipituuden sekä runkoluvun suhteellinen keskivirhe pienenee noin 2–3 prosenttiyksikköä. Keskiläpimitan virhe muuttuu 4,16 prosenttiyksikköä pienemmäksi koealalta kuviotason laskentaan siirryttäessä. Tähän virheiden pienemiseen vaikuttaa todennäköisesti eniten laserpulssien suuri määrä kuviotasolla, jolloin laskennassa tapahtuu keskiarvoistumista. Koealojen perusteella suoritettavan mallinnuksen takia selittävässä muuttujissa esiintyvät erot ja niiden merkitykset voivat heiketä siirryttäessä kuviotasolle.

Saatuja tuloksia verrattiin myös UPM:n kuviokirjan päivitetystä puustotunnuksista laskettuihin luotettavuuksiin. Kuviokirjan tiedot ovat kuitenkin vanhoja, useilla kuvioilla 1990- ja jopa 1980-luvulta. Kuviokirjan tuloksia oli päivitetty vain toimenpiteiden jälkeisillä mittauksilla ja puuston kasvumalleilla, siten laserkeilauksella saatuja tuloksia ei voida Matalansalon tapauksessa suoraan verrata ajantasaiseen SOLMU-tietosisältöiseen kuvioittaiseen arviointiin. Useimmissa puustotunnuksissa laserkeilauksella saatiin suhteellisen RMSE:n perusteella yli kaksi kertaa tarkempi tulos verrattuna kuviokirjasta laskettuihin luotettavuustunnuksiin. Kuviokirjan perusteella laskettu suuri runkoluvun suhteellinen keskivirhe selittyi osaksi sillä, että maastossa on puuston tiheyttä kuvaavana tunnuksena mitattu vain puuston pohjapinta-ala, jonka jälkeen läpimittajakauman perusteella on estimoitu kuviolle puustoa kuvaava runkoluku. Tämä laskentatapa aiheuttaa puuston runkolukuun noin 20–40 % virheen jo oikeallakin pohjapinta-alan arvolla (esim. Kangas ja Maltamo 2000). Edelleen runkoluvun virhettä lisännee usean vuoden mittainen puuston kehityksen simulointi.

SOLMU-tietosisältöisen kuvioittaisen arvioinnin tarkkuutta ja luotettavuutta ovat tutkineet esimerkiksi Kangas ym. (2002) sekä Haara ja Korhonen (2004) laajalla ja luotettavalla aineistolla (taulukko 8). Matalansalossa toteutettu laserkeilaus tuotti huomattavasti tarkempia puustotunnuksia kuin mitä kyseisissä tutkimuksissa on saatu. Toisaalta täytyy muistaa, että laserkeilauksella saadut tulokset koskivat metsikön kokonaispuustoa. Puuston keskiläpimitta on ainoa tunnus, jossa laserkeilauksen ja kuvioittaisen arvioinnin ero ei ole kovin suuri. Muissa tunnuksissa laserkeilaus tuotti puolet pienemmän

suhteellisen keskivirheen kuin kuvioittainen arviointi. Tosin tässä tutkimuksessa on käytetty vain 67 metsikkökuvioita ja regressiomalleja testattiin laadinta-aineistossaan.

Kuvioittaisen arvioinnin tarkistusmittaukset on yleensä toteutettu objektiivisesti valitun ja tarkasti mitatun sekä riittävän kattavan koealaverkoston avulla (Kangas ym. 2002). Tällöin kuviokohtaisiin tuloksiin sisältyy kuitenkin otantavirhettä (Kangas ym. 2002). Haaran ja Korhosen (2004) tutkimuksessa tämä otantavirhe otettiin huomioon, jolloin kuviokohtainen tilavuuden suhteellinen keskivirhe pieneni 24,80 prosentista 21,40 prosenttiin. Otantavirheen poisto ei kuitenkaan sovellu tämän tutkimuksen laserkeilauksella saatujen tulosten kuviokohtaisten tulosten analysointiin, koska maastossa mitattuja koealatuloksia käytettiin regressioyhtälöiden mallintamiseen. Laserkeilauksella mitatut kuviokohtaiset puustotunnusten estimaatit ja virheet niissä eivät ole riippumattomia vaan vahvasti korreloituneita mallien kautta. Jos luotettavuutta tarkasteltaisiin jollakin toisella testialueella jolla on tehty kuvioittaisen arvioinnin tarkistusmittaus ja siellä sovellettaisiin tässä tutkimuksessa laadittuja regressiomalleja, saaduista tuloksista voitaisiin poistaa otantavirhe. Toisaalta mallien tarkkuus huononee, kun niitä sovelletaan laadinta-aineistonsa ulkopuolella (Uuttera ym. 2005).

5 Lopuksi

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin harvapulssisesta laserkeilausaineistosta pystytään ennustamaan kuviokohtaiset puustotunnukset. Saatujen tutkimustulosten ja aikaisemmin julkaistujen lasertutkimusten perusteella on luultavaa, että laserkeilausta tullaan käyttämään Suomessa lähitulevaisuudessa hyödyksi metsien inventoinnissa ja metsävaratiedon keräämisessä. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että kuvion kokonaispuuston keski- ja summatunnusten tuottamisessa päästään laserkeilausta hyödynnettäessä selvästi tarkempaan tarkkuuteen kuin SOLMU-tietosisältöisellä kuvioittaisella arvioinnilla. Tosin regressiotekniikan avulla ei ainakaan vielä pystytä tuottamaan tarkkoja ennusteita kuvion puulajeista eikä myöskään puutavaralajirakenteesta, mitkä ovat

erittäin tarpeellisia käytännön metsätaloudessa. Nykyisellään laserkeilaus yhdistettynä ilmakuvatulkintaan soveltuukin parhaiten alueellisen metsävaratiedon keräämiseen. Tilakohtaisen metsäsuunnittelun tarpeisiin tarvitaan edelleen myös maastotyötä esimerkiksi arvokkaiden luontokohteiden, taimikoiden ja toimenpidetarpeiden arvioimiseksi.

Eräs laserkeilauksen käytön rajoite Suomessa on tähän asti ollut korkeat aineistokustannukset. Tämä on liittynyt tiheäpulsseen laserkeilaukseen lennetäessä matalalla useita kapeita linjoja. Regressiomenetelmä on jo tällä hetkellä riittävän kustannustehokas operatiiviseen käyttöön Norjassa. Suomessa sen hyödyntämisestä on vasta vähän tutkimusta, joten menetelmän soveltaminen on vielä epävarmaa. Lisäksi regressiomenetelmän käyttöönottoa hidastaa se, että ei ole olemassa koko Suomen aluetta kattavia regressioyhtälöitä. Vaikka toistaiseksi tehdyt mallien testaukset ovatkin osoittaneet mallien riittävän toimivuuden maantieteellisesti erillisillä alueilla (Uuttera ym. 2005), täytynee esimerkiksi Lappiin ja Pohjanmaalle laatia omat mallinsa. Mallien laadinta-aineistoja tulisikin kerätä lisää ympäri Suomea, jolloin voitaisiin tehdä uusia ja alueellisesti tarkempia regressiomalleja. Tällöin metsien alueelliset rakenteelliset erot voitaisiin ottaa paremmin huomioon. Muutokset laserkeilainlaitteistoissa ja niiden kalibroinneissa voidaan taas ottaa huomioon luokkamuuttujina laadittavissa malleissa.

Tulevaisuudessa laserkeilauksen kehittyessä on luultavasti mahdollista hyödyntää myös tällä hetkellä kustannuksiltaan kallista yksinpuintulkintaa. Yksinpuintulkinnan etuna on puiden fyysisten tunnusten suora havainnointi ja lisäksi se voi tarjota parannusmahdollisuuksia mm. puulajitulkintaan. Myös yksinpuittaisessa lähestymistavassa joudutaan käyttämään regressiomalleja, kun ennustetaan puun rinnankorkeusläpimitta ja edelleen tilavuus (esim. Kalliovirta ja Tokola 2005, Laasasenaho 1982). Relaatio latvuksen koon ja rinnankorkeusläpimitan välillä ei aina ole voimakas ja lisäksi mallin laadintaa varten latvuksen koko mitataan yleensä alhaalta päin maastomittausten avulla ja laadittua mallia sovelletaan ylhäältä päin kuvatun kaukokartoitusmateriaalin informaatiolla. Yksinpuintulkintaan liittyy myös eräänä ongelmana useampijakoisten metsien tulkinta, jolloin alemmat kerrokset jäävät löytymättä (Maltamo ym. 2004a, b).

Tulevaisuudessa paras lopputulos saataisiin ehkä aikaiseksi yhdistämällä regressiomenetelmä ja yksinpuintulkinta. Tällöin metsikön kokonaispuustotunnukset voitaisiin laskea regressiotekniikan avulla ja laseraineiston pistetiheyden kasvaessa puiden pituusjakauma ja puulaji-informaatio, ainakin havupuiden osalta (esim. Holmgren ja Persson 2004), tuotettaisiin yksinpuintulkinnalla. Tällöin olisi mahdollista laskea ennusteita myös kuviolta kertyvistä puutavaralajeista, mikä olisi hyödyllistä mm. leimikoiden ja puunhankinnan suunnittelussa.

Kesällä 2005 Suomesta on ensimmäistä kertaa ollut saatavilla myös digitaalista ilmakuvaa. Tällaisen materiaalin yhdistäminen laserkeilainaineistoon voi tarjota uusia mahdollisuuksia esimerkiksi puulajitulkintaan.

Laserkeilauksen soveltaminen metsien inventointiin ja metsävaratiedon keräämiseen on mielenkiintoinen ja haastava tehtävä. Menetelmä tarjoaa paljon mahdollisuuksia ja kehitysvaihtoehtoja erityisesti metsäsuunnittelun tarpeisiin. Oman haasteensa asettavat myös jatkuvasti kehittyvät laserkeilainlaitteet ja -menetelmät.

Kiitokset

Kirjoittajat haluaisivat kiittää mmyo Henri Maijalaa ja mmyo Risto Juntusta osallistumisesta tutkimuksen maastoaineiston keruuseen. Lisäksi kiitämme metsävaratietopäällikkö Kauko Kärkkäistä UPM Kymmenestä maastoaineiston hankinnan käytännön järjestelyistä. Lopuksi kiitämme artikkelin tarkastajia MMT Markus Holopaiasta ja MMT Ilkka Korpe-laa käsikirjoituksen parannusehdotuksista.

Kirjallisuus

- Anttila, P. 2002a. Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36: 549–560.
- 2002b. Nonparametric estimation of stand volume using spectral and spatial features of aerial photographs and old inventory data. *Canadian Journal of Forest Research* 32: 1849–1857.
- & Lehikoinen, M. 2002. Kuviottaisten puustotunnusten estimointi ilmakuvilta puoliautomaattisella latvusten segmentoinnilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/3002: 381–389.
- Baltsavias, E. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 83–94.
- Gaveau, D. & Hill, R. 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 650–657.
- Haara, A. & Korhonen, K.T. 2004. Kuviottaisten arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Holmgren, J. 2004. Prediction of tree height, basal area and stem volume in forest stands using airborne laser scanning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 543–553.
- & Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90: 415–423.
- Hyvönen, P. 2002. Kuviottaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi k-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM-satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/3002: 363–379.
- Hyyppä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- Kangas, A. & Maltamo, M. 2000. Performance of percentile based diameter distribution prediction and Weibull method in independent data sets. *Silva Fennica* 34(4): 381–398.
- , Heikkinen, E. & Maltamo, M., 2002. Puustotunnusten maastoarvioinnin luotettavuus ja ajanmenekki. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 425–440.
- Kalliovirta, J. & Tokola, T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39(2): 227–248.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume function for pine, spruce and birch. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 108. 74 s.
- Lappi, J. 1993. Metsäbiometriian menetelmiä. *Silva Carelica* 24. 182 s.
- Laser Maps. 2005. [www-sivusto]. Saatavissa: <http://www.lasermaps.com/company.htm> [Viitattu 14.5.2005].
- Lim, K., Treitz, P., Baldwin, K., Morrison, I. & Green, J. 2003a. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 648–678.

- , Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. & Flood, M. 2003b. Lidar remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27: 88–106.
- Magnussen, S. & Boudewyn, P. 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1016–1031.
- Maltamo, M., Tokola, T. & Lehtikoinen, 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.
- , Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004a. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- , Mustonen, K., Hyypä, J., Pitkänen, J. & Yu, X. 2004b. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in a boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791–1801.
- , Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006. Non-parametric estimation of stem volume using laser scanning, aerial photography and stand register data. *Canadian Journal of Forest Research*. (in press).
- Nilson, T. & Peterson, U. 1994. Age dependence of forest reflectance: Analysis of main driving factors. *Remote Sensing of Environment* 48: 319–331.
- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246–253.
- 2002. 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.
- & Bjerckness, K. 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 78: 328–340.
- & Økland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79: 105–115.
- , Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: The Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 482–499.
- , Bollandsås, O.M. & Gobakken, T. 2005. Comparing regression methods in estimation of biophysical properties of forest stands from two different inventories using laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 94: 541–553.
- Pekkarinen, A. 2002. Image segment-based spectral features in the estimation of timber volume. *Remote Sensing of Environment* 82: 349–359.
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68: 925–932.
- Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J. & Yu, X. 2004. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. Teoksessa: Thies, M., Koch, B., Spiecker, H. & Weinacker, H. (toim.). Laser scanners for forest and landscape assessment. Proceedings of the ISPRS working group VIII/2. Freiburg, Germany, October, 3–6 2004. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Volume XXXVI, Part 8/W2. s. 187–191.
- St-Onge, B., Treitz, P. & Wulder, M. 2003. Tree and canopy height estimation with scanning lidar. Teoksessa: Wulder M. & Franklin S. (toim.). Remote sensing of forest environments. Kluwer Acad. Publ. s. 489–509.
- Uuttera, J., Hiltunen, J., Rissanen, P., Anttila, P. & Hyvönen, P. 2002. Uudet kuvioittaisen arvioinnin menetelmät – arvio soveltuvuudesta yksityismaiden metsäsunnitteluun. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 523–531.
- , Anttila, P., Suvanto, A. & Maltamo, M. 2005. The accuracy of remote sensing-based forest attribute estimation methods suitable for planning process of Finnish privately owned forests. (Käsikirjoitus).
- Veltheim, T. 1987. Pituusmallit männyille, kuuselle ja koivulle. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma*. Helsingin yliopisto. 59 s.
- Wehr, A. & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 68–82.