

**Metsätehon raportti 223
1.8.2013**

Puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaus kaukokartoituksella

Esiselvitys ja käytännön testi

**Jari Vauhkonen
Ville Kankare
Topi Tanhuanpää
Markus Holopainen
Mikko Vastaranta**

ISSN 1796-2374 (Verkkojulkaisu)

METSÄTEHO OY
Vernissakatu 4
01300 Vantaa

www.metsateho.fi

Puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaus kaukokartoituksella

Esiselvitys ja käytännön testi

Jari Vauhkonen

Ville Kankare

Topi Tanhuanpää

Markus Holopainen

Mikko Vastaranta

Kirjoittajat työskentelevät Helsingin yliopiston
metsätieteiden laitoksella.

Metsätehon raportti 223

1.8.2013

ISSN 1796-2374 (Verkojulkaisu)

© Metsäteho Oy

Sisällys

TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	6
I KIRJALLISUUSKATSAUS	7
1 JOHDANTO.....	7
2 RUNKOLUKUSARJAN JA LAATUTUNNUSTEN TUOTTAMINEN LASERKEILAUKSEEN JA ILMAKUVIIN PERUSTUVALLA <u>ALUEPOHJAISELLA TULKINNALLA</u>	8
2.1 Käytetyt aineistot.....	8
2.2 Menetelmät ja saadut tarkkuudet.....	8
3 RUNKOLUKUSARJAN JA LAATUTUNNUSTEN TUOTTAMINEN LASERKEILAUKSEEN PERUSTUVALLA <u>YKSINPUINTULKINNALLA</u>	10
3.1 Käytetyt aineistot.....	10
3.2 Puiden tunnistaminen.....	10
3.3 Puutunnusten ennustaminen löydetyille puille.....	11
3.4 Metsikkötason tunnuksset	12
4 RUNKOLUKUSARJAN TUOTTAMINEN MAASTOLASERKEILAUKSEN AVULLA	14
4.1 Käytetyt aineistot.....	14
4.2 Käytetyt menetelmät	14
4.3 Puiden kartoitus.....	14
4.4 Läpimitan ja pituuden mittausta.....	15
II SUOSITUS INVENTOINTIKETJUJOKSI	16
5 SUOSITUS INVENTOINTIKETJUJOKSI AIEMPIEN TULOSTEN PERUSTEELLA .	16
III KÄYTÄNNÖN TESTI	18
6 TAVOITE	18
7 AINEISTOT JA MENETELMÄT	18
7.1 Kohdealue ja maastomittaukset	18
7.2 Lentolaserkeilaus	20
7.3 Maastolaserkeilaus	20
7.4 Hakkuukonemittaukset.....	22
7.5 Puutavaralajien ennustaminen	22
7.6 Laadun ennustaminen	23

8 TULOKSET	23
8.1 Pituus	23
8.2 Läpimitta ja runkolukusarja	23
8.3 Puutavaralajit	24
8.4 Puun laadun ennustaminen	26
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	26
10 YHTEENVETO	28
IV ESISELVITYKSEN PÄÄTELMÄT.....	29
11 SUOSITUS INVENTOINTIMENETELMÄKSI	29
12 MENETELMIEN KUSTANNUKSET	30
13 KESKEISET JATKOTUTKIMUKSET	30
LÄHTEET.....	31

TIIVISTELMÄ

Metsägroup Oy:n ja Metsäteho Oy:n Helsingin yliopiston metsätieteiden laitokselta tilaama esiselvitys ”puuston runkolukusarjan ja laatutunnusten mittaaminen kaukokartoituksella” on jaettu neljään osioon: 1) kirjallisuuskatsaus, 2) suositus inventointiketjuksi, 3) käytännön testi ja 4) päätelmät. Selvitys kuuluu Suomen biotalousklusteri FIBIC Oy:n EffFibre-tutkimusohjelmaan.

Kirjallisuuskatsaus sisälsi seuraavat menetelmät: 1) Laserkeilaukseen ja ilmakuviin perustuva aluepohjainen tulkinta, joka voidaan toteuttaa olemassa olevilla julkisilla kaukokartoitusaineistoilla (esim. Maanmittauslaitoksen ja Metsäkeskuksen ALS- ja ilmakuva-aineistot), 2) Laserkeilaukseen perustuva yksinpuintulkinta, joka voidaan toteuttaa, jos käytettävissä on edellistä tiheämpää laserkeilausaineistoa ja 3) puukohtainen maastolaserkeilaus, joka edellyttää laserkeilaimen viemistä mitattavalle kohteelle (terrestrial laser scanning, TLS/mobile laser scanning, MLS). Kirjallisuuskatsauksen perusteella tuotimme vision tulevaisuuden inventointiketjun vaihtoehtoiksi. Visiomme keskeinen idea on, että maastolaserkeilausdataa voidaan käyttää ilmasta tuotettujen ennusteiden täydentämisessä ja/tai tarkentamisessa. TLS-/MLS-tekniikkaa on mahdollista soveltaa toisaalta aluepohjaisessa tulkinnassa tarvittavan maastoreferenssiaineiston hankintaan ja toisaalta tehdyn tulkinnan tarkentamiseen esim. leimikkokohtaisilla puuston määrän ja laadun mittauksilla.

Käytännön testiosiossa toteutettu tutkimus perustui kirjallisuuskatsauksen perusteella tuotettuun visioon. Tutkimuksessa selvitettiin eri laserkeilausmenetelmien ja niiden yhdistelmän hyödyntämismahdollisuuksia tarkan runkolukusarjan, puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ja puun laadun ennustamisessa. Tulokset osoittivat että maastolaserkeilausmenetelmä sekä maastolaserkeilauksen ja tiheäpulsseisen lentolaserkeilauksen yhdistelmä mahdollistivat tarkan puutason puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ennustamisen. Erityisesti tukkitilavuus ennustettiin tarkasti. Myös tukkipuiden laadun ennustamistarkkuus oli hyvä.

Tärkeitä jatkotutkimusten aiheita ovat mm. TLS ja MLS koealojen ja leimikkoiden mittauksessa: operatiivisten menetelmien kehittäminen ja kustannustehokkuuden tarkastelu, TLS-/MLS-/ALS- ja hakkuukonemittausten yhdistäminen, puiden paikannustarkkuuden (GPS-imu) parantaminen, tukin todellisen laadun (saheet / röntgenmittaukset tehtaalla) mittaaminen laserkeilauksella, ALS-aineiston pulssitiheyden merkityksen tarkempi selvittäminen sekä uusien sensorien (aaltomuoto-LiDAR, hyperspektri-LiDAR) hyödyntäminen runkolukusarjan ennustamisessa ja puulajitulkinnassa. Lisäksi tulevaisuudessa keskeinen kysymys on, kuinka metsävaratiedossa tapahtuvia muutoksia (hakkuut, metsätuhot) päivitetään mahdollisimman ajantasaisesti.

ABSTRACT

Current Potential of Remote Sensing to Measure Timber Quantity and Quality Parameters – Review and Practical Test

The pilot study and report, commissioned by Metsägroup Oy and Metsäteho Oy, titled: “Current potential of remote sensing to measure timber quantity and quality parameters”, is divided into four sections: a literature review, suggestions for alternative forest inventory chain, a practical test, and discussion and conclusions. This study was carried out as part of Finnish Bioeconomy Cluster FIBIC Ltd’s EffFibre research programme.

The following methods were included in the literature review: (1) area-based approach using laser-scanning data and aerial photographs, which can be done with existing and public remote sensing materials (e.g., airborne laser scanning, ALS, and aerial photograph materials from the National Land Survey of Finland or the Forest Centre); (2) laser-scanning-based individual tree detection, which can be done if the pulse density is higher than in the materials mentioned in (1); and (3) tree-level terrestrial laser scanning, which requires that the scanner be brought to the surveyed area (terrestrial laser scanning, TLS/mobile laser scanning, MLS).

A vision for an alternative forest-inventory chain in the future was produced based on the extensive literature review and on the idea that terrestrial laser scanning could be used to reinforce and/or improve the accuracy of forest-attribute estimations from aerial applications. It is possible to utilize TLS/MLS technologies also with area-based approaches by measuring the required field reference and to acquire more detailed information (e.g., stem distributions and quality features) from the forest management stands. The vision for an alternative forest inventory chain was the basis of the practical test. The objective was to research the usability of different laser-scanning methods, and the various methods in combination, to measure accurate tree-level stem distributions, timber quantities, and quality features. The results showed that TLS and a combination of TLS and high density ALS can be used to measure timber quantities accurately, especially, log volume. Also the accuracy of quality feature estimation was promising.

Important study subjects in the future are, e.g., using TLS and MLS to measure plot- or stand-level information; developing practical methodologies and detailed examination of cost efficiency; combining the TLS/MLS/ALS and harvester measurements; improving tree-location (GPS-IMU) accuracy; measuring the real quality of logs using laser scanning (sawn timber/x-ray measurements in the factory); determining optimal ALS pulse density; and using of new sensors (full-waveform and hyperspectral LiDAR) in stem-distribution estimation and tree-species detection. In addition, two main questions will be how to detect changes in the forest (forest management procedures, damages) and how to keep forest resource information up to date.

I KIRJALLISUUSKATSAUS

1 JOHDANTO

Laserkeilaus ja korkean resoluution digitaaliset ilmakuvat mahdollistavat puusto-, puu- ja jopa oksatason tarkastelun. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tiivistetään viimeisimpiä tutkimuksia, joissa on hyödynnetty laserkeilausta (airborne laser scanning, ALS) ja ilmakuvia puuston runkolukusarjan ja laa-
tutunnusten ennustamisessa. Kirjallisuus on jaettu tutkimuksiin, jotka käsittelevät

- Laserkeilaukseen ja ilmakuviin perustuvaa aluepohjaista tulkintaa, joka voidaan toteuttaa saatavissa olevilla julkisilla kaukokartoitusaineistoilla (esim. Maanmittauslaitoksen ja Metsäkeskuksen ALS- ja ilmakuva-aineistot) (kappale 2)
- Laserkeilaukseen perustuvaa yksinpuintulkintaa, joka voidaan toteuttaa, jos käytettävissä on edellistä tiheämpää laserkeilausainestoa (kappale 3)
- puukohtaista maastolaserkeilausta, joka edellyttää laserkeilaimen viemistä mitattavalle kohteelle (terrestrial laser scanning, TLS/mobile laser scanning, MLS) (kappale 4)

Tulosten hyvyyden ja luotettavuuden arvioinnissa on tyypillisesti käytetty tunnuksia RMSE (root mean squared error, keskineliövirheen neliöjuuri) ja bias (harha), jotka voidaan laskea esim. seuraavasti:

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

RMSE-arvo kuvaa tarkastellun tunnuksen keskimääräistä virhettä ja harha mahdollisen systemaattisen virheen suuntaa ja voimakkuutta. Esimerkiksi 2 cm RMSE:n ja 0,5 cm harhan yhdistelmä puun läpimitan ennusteessa tarkoittaisi ennustettujen arvojen sijaitsevan keskimäärin 2 cm päässä todellisista arvoista, ollen keskimäärin 0,5 cm aliarvioita. RMSE ja harha voidaan esittää myös suhteellisella asteikolla (%), jolloin absoluuttiset arvot on jaettu tarkasteltavan tunnuksen keskiarvolla.

Yhteenvedon lisäksi annetaan suosituksia puuston runkolukusarjan ja laa-
tutunnusten määrittämiseen tarvittavista aineistoista ja niiden yhdistämisestä sekä kuvataan tulevaisuuden kehitys- ja tutkimuskohteita. Kirjallisuuskatsaus on rajattu koskemaan pohjoismaisia, puutavaralajien ennustamiseen tähtääviä menetelmiä tai menetelmäketjuja.

2 RUNKOLUKUSARJAN JA LAATUTUNNUSTEN TUOTTAMINEN LASERKEILAUKSEEN JA ILMAKUVIIN PERUSTUVALLA ALUEPOHJAISELLA TULKINNALLA

2.1 Käytetyt aineistot

Tutkimuksissa, joissa on ennustettu aluepohjaisella tulkinnalla puutavaralajeja tai runkolukusarjaa, käytetty laserkeilausaineiston pulssitiheys on ollut n. 0,7 pulssia /m² (Korhonen ym. 2008; Packalén & Maltamo 2008; Peuhkurinen ym. 2008; Maltamo ym. 2010). Holopaisen ym. (2010) tutkimuksessa pulssitiheys oli n. 1,8 pulssia / m². Puulajitulkinnassa käytetään yleisesti lisätietolähteenä ilmakuvia (em. tutkimuksissa käytetty 0,5 m resoluution kuvilta irrotettuja lähi-infrapunan, punaisen ja vihreän aallonpituuksia).

Aluepohjainen tulkinta edellyttää kattavan maastoaineiston hankintaa inventoitavalta alueelta. Packalénin ja Maltamon (2008) ja Peuhkurisen ym. (2008) tutkimuksissa maastoaineisto käsitti 463–474 koealaa (9 m säde); Holopaisen ym. (2010) aineisto oli laajuudeltaan 264 koealaa (10 m säde). Maastokoealojen tulee edustaa mahdollisimman hyvin koko inventoitavan alueen puuston vaihtelua, joten onnistunutta koealojen valintaa varten tarvitaan ennakkotietoa (esim. vanha kuviotieto) inventoitavasta alueesta. Runkolukusarjan ei-parametrisessa ennustamisessa koealoilta pitää olla käytettävissä lista luetuista puista (ts. keskitunnukset eivät riitä).

2.2 Menetelmät ja saadut tarkkuudet

Runkolukusarjan tuottamiseen aluepohjaisella tulkinnalla on kaksi päämenetelmää. Runkolukusarja voidaan tuottaa perustuen teoreettisen läpimitajakauman (esim. Weibull-jakauman) ennustamiseen ja käyttöön (Packalén & Maltamo 2008; Holopainen ym. 2010). Toinen tapa on hyödyntää maastokoealoilta mitattuja puita ja tuoda nämä todelliset mitatut puutiedot ennustettaville koealoille ei-parametrisen menetelmän avulla (Packalén & Maltamo 2008; Peuhkurinen ym. 2008).

Tuotettujen runkolukusarjojen tarkkuutta on arvioitu näissä tutkimuksissa lähinnä jakaumista laskettujen puustotunnusten perusteella. Packalénin ja Maltamon (2008) tutkimuksessa tarkkuutta arvioitiin lisäksi jakaumien sopivuutta asteikolla 0–1 kuvaavan virheindeksin avulla (0=täydellinen vastaavuus; 1=jakaumat eivät ole päällekkäin). Tulosten perusteella k-MSN-lähimmän naapurin hakumenetelmällä tuotetut runkolukusarjat vastasivat maastossa mitattuja hieman paremmin (0,21–0,29 riippuen puulajista) kuin Weibull-jakauman avulla ennustetut (0,32–0,34).

Runkolukusarjalta tuotettujen metsikkötunnusten (tilavuuksien) ennustustarkkuuksia:

- Packalén & Maltamo (2008), k-MSN-menetelmällä kokonaistilavuuden virhe (RMSE) kuviotasolla 21,07 m³/ha (10,36 %). Puulajeittaiset virheet männylle 27,71 m³/ha (28,8 %), kuuselle 26,99 m³/ha (32,64 %) ja lehtipuille 13,7 m³/ha (62,33 %). Weibull-jakauman avulla tuotettu kokonaistilavuus noin kaksi prosenttiyksikköä epätarkempi ja puulajeittaisissa tuloksissa hieman enemmän vaihtelua.
- Peuhkurinen ym. (2008): kokonaistilavuuden virhe kuviotasolla 7,0 %; puulajeittaiset virheet 47,7 % (mänty), 20,3 % (kuusi) ja 72,9 % (lehtipuut).

Runkolukusarjalta tuotettujen puutavaralajien ennustustarkkuuksia:

- Peuhkurinen ym. (2008): männyn ja kuusen tukkitilavuuksien RMSE:t 66,0 m³/ha (32,2 %) ja 31,8 m³/ha (27,7 %)
- Packalén & Maltamo (2008): tukkitilavuuksien RMSE:t männylle 20,21 m³/ha (39,97 %), kuuselle 23,08 m³/ha (43,56 %) ja lehtipuille 5,64 m³/ha (114,54 %). Kuitupuun tilavuuksien RMSE:t männylle 13,26 m³/ha (30,30 %), kuuselle 12,20 m³/ha (47,71 %) ja lehtipuille 9,95 m³/ha (74,30 %).
- Holopainen ym. (2010): Weibull-jakauman avulla ennustetun runkolukusarjan perusteella tuotettujen tukkitilavuuksien RMSE:t männylle 7,0 m³/ha (79,2 %), kuuselle 35,5 m³/ha (33,6 %) ja lehtipuille 6,2 m³/ha (78,6 %). Kuitupuun tilavuuksien RMSE:t männylle 7,0 m³/ha (167,6 %), kuuselle 11,4 m³/ha (46,7 %) ja lehtipuille 25,8 m³/ha (218,5 %).

Em. tutkimusten lisäksi Korhonen ym. (2008) käyttivät harvaa laserkeilausaineistoa ennustamaan teoreettista ja hakkuukonemittauksella määritettyä tukkiosuutta. Teoreettisen tukkiosuuden RMSE oli 19,2 m³/ha (9,1 %), mutta todellisen saannin ennustamistarkkuus oli heikompi (30,6 m³/ha, 18,0 %).

Laatutunnuksista aluepohjaiselle menetelmällä on mahdollista ennustaa elävän latvuksen alarajan korkeutta. Næsset ja Økland (2001) raportoivat latvusrajan korkeuden virheeksi 1,24–1,52 m (20,9–23,3 %) ja latvuksen pituuden virheeksi 6,32–7,11 % (8,8–10,9 %). Vastaavasti Maltamon ym. (2010) vertailututkimuksessa latvuksen alarajan virhe koealatasolla vaihteli noin 1,0 ja 1,5 m välillä.

3 RUNKOLUKUSARJAN JA LAATUTUNNUSTEN TUOTTAMINEN LASERKEILAUKSEEN PERUSTUVALLA YKSINPUINTULKINNALLA

3.1 Käytetyt aineistot

Yksittäisten puiden tunnistaminen laserkeilausaineistosta edellyttää korkeaa pulssitiheyttä. Puiden paikantamisen on todettu onnistuvan aineistossa, jonka tiheys on vähintään noin 2 pulssia / m² (Kaartinen ym. 2012), mutta laserkeilausaineiston ominaisuuksiin perustuvaa myöhempää puutunnusten tulkintaa hyödyttää hieman korkeampi pulssitiheys. Toisaalta erityisen korkea tiheys (esim. 12–15 pulssia/m²; Vauhkonen ym. 2013a, Holmgren ym. 2012) ei ole tuottanut parempia tuloksia puutunnuksia ennustettaessa. Tutkimuksissa on käytetty esim. seuraavia pulssitiheyksiä:

- Maltamo ym. (2009): keskimäärin noin 4 pulssia / m²
- Vauhkonen ym. (2010): keskimäärin 6–8 pulssia / m²
- Yu ym. (2011): keskimäärin 2,6 pulssia / m²

Laserkeilausaineiston lisäksi puutason tulkinnassa tarvitaan yleensä myös maastoaineistoa. Puiden läpimitan ja tilavuuden ennustaminen voi perustua olemassa olevien mallien (Kalliovirta & Tokola 2005; Laasasenaho 1982) ketjutukseen, mutta koska nämä mallit on laadittu maastomittausaineistojen pohjalta, niiden luotettava käyttö edellyttää yleensä mallien kalibroimista paikallisten maastomittausten avulla (esim. Peuhkurinen ym. 2011). Jos tavoitteena on ennustaa lisäksi puulajia, ennustusmenetelmä on yleensä ei-parametrinen (esim. lähimmän naapurin menetelmä), joka edellyttää paikallisen maastoreferenssi-aineiston keräämistä. Tutkimuksessa on käytetty esim. seuraavanlaajuisia opetusaineistoja:

- Yu ym. (2011): 1476 puuta 69 koealalta (2/3 mallinnuksessa, 1/3 testauksessa)
- Vauhkonen ym. (2010): 1 846 puuta mallinnuksessa, 1 249 testauksessa – yhteensä 77 koealalta. Simuloidussa testissä tarkkuudet pysyivät erityisesti puulajin suhteen samalla tasolla vielä 237 puun aineistolla.
- Korpela ym. (2010), pelkän puulajin tulkinta. Yhteensä noin 13 000 puun aineistosta käytettiin aluksi opetusaineistona 30 % puista, mutta opetusaineiston määrän pudottaminen 2,5 %:iin ei vaikuttanut tarkkuuksiin merkittävästi.

3.2 Puiden tunnistaminen

Puiden tunnistamiseen on kehitetty useita erilaisia tekniikoita, joista useimmat perustuvat 2,5-ulotteisen latvuston korkeusmallin tulkintaan. Puiden tunnistamisen onnistuminen vaihtelee algoritmin ja puuston rakenteen mukaan esimerkiksi seuraavasti:

- Kaartinen ym. (2012), usean tunnistusalgoritmin vertailututkimus. Kahden kuvion runkoluvusta tunnistettiin 25–102 % menetelmästä riippuen. Pintamallin visuaalinen tulkinta tuotti 70 % tunnistustuloksen.
- Vauhkonen ym. (2012), usean tunnistusalgoritmin vertailututkimus. Maastossa mitatusta runkoluvusta löytyi keskimäärin 54 % norjalaisella ja 73 % ruotsalaisella (varttuneempaa puustoa) testialueella. Löydetyistä puista hieman pienempi osa pystyttiin linkittämään maastossa mitattuihin puihin eli osa algoritmeista tuotti huomattavan paljon komissiovirheitä.
- Yu ym. (2011), testi Evon alueella: keskimäärin 69 % puista löydetty (43–96 % vaihtelu koealojen välillä; algoritmin tuloksen ja koealan todellisen runkoluvun välillä riippuvuus).
- Vauhkonen ym. (2013a), testi Joensuun alueella: keskimäärin 56 % puista löydetty, 20–99 % vaihtelu koealojen välillä.

Päätelvuskerroksessa olevien puiden on todettu löytyvän varmimmin ja tunnistettujen puiden osuus kuvaakin huomattavasti suurempaa osaa metsikön tilavuudesta kuin runkoluvusta. Esimerkiksi Perssonin ym. (2002) tutkimuksessa 71 % löydetyistä puista vastasi 91 % tilavuudesta ja vastaavasti Vauhkonen ym. (2013a) tutkimuksessa 56 % löydetyistä puista 87 % tilavuudesta.

3.3 Puutunnusten ennustaminen löydetyille puille

Puutunnusten ennustamisen tarkkuus riippuu testialueesta, maastoaineiston laajuudesta ja käytetystä ennustusmenetelmästä. Tutkimustuloksia tarkasteltaessa pitää lisäksi huomioida kuinka käytännön läheisesti tulosten tarkkuus on määritetty (arvioinnissa käytetyn aineiston laajuus). Esimerkiksi alla olevista raporteista Maltamon ym. (2009) tulokset perustuvat pienen määrään osin käsin rajattuja puita ja myös Vauhkonen ym. (2010) tutkimuksessa puut on rajattu puoliautomaattisesti, joten nämä tulokset edustanevat saavutettavissa olevan tarkkuuden ylärajaa ja niihin tulee suhtautua varauksella. Yu ym. (2011) ja Vauhkonen ym. (2013a) tutkimuksissa puiden rajaukseen on käytetty algoritmia.

– Raportoituja läpimitan ennustusvirheitä (root mean squared error, RMSE):

- Maltamo ym. (2009): 1,25 cm (5,16 %)
- Vauhkonen ym. (2010): 2,5 cm (12,9 %)
- Yu ym. (2011): 3,89 cm (21,35 %)
- Vauhkonen ym. (2013a): 3,0–3,9 cm (15–20 %), riippuen menetelmäkohtaisista parametreista

– Raportoituja tilavuuden ennustusvirheitä (root mean squared error, RMSE):

- Maltamo ym. (2009): 49,30 dm³ (11 %)

- Vauhkonen ym. (2010): 91,7 dm³ (30,1 %)
- Yu ym. (2011): 123,6 dm³ (45,77 %)
- Vauhkonen ym. (2013a): 122–148 dm³ (42–51 %), riippuen menetelmäkohtaisista parametreista

– Puulajin tunnistamista on tutkittu runsaasti siten, että tutkimusaiheena on ollut pelkkä puulaji (ei muita puutunnuksia). Pohjoismaisilla testialueilla saatujen tulosten tarkkuudet ovat vaihdelleet välillä 74–96 % (Ørka ym. 2012). Yhdessä muiden tunnusten kanssa tulkittuna puulajin tunnistuksen tarkkuudeksi on saatu esim. 78 % (Vauhkonen ym. 2010) ja 88–91 % (Vauhkonen ym. 2013a). Näistä tuloksista jälkimmäinen on voimakkaasti mäntyvaltaiselta koealueelta, kun taas edellisellä puulajikohtaista vaihtelua on enemmän.

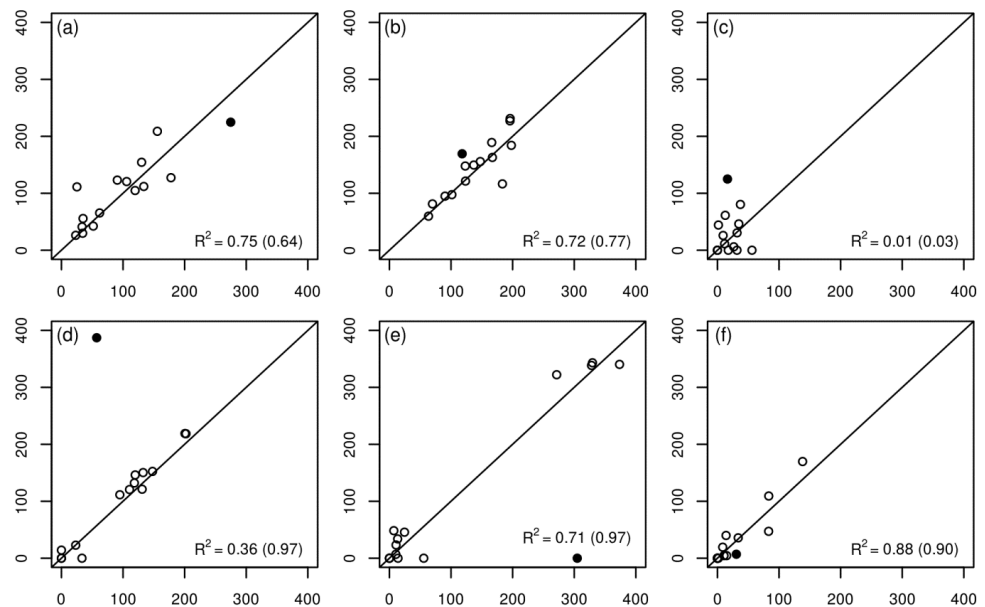
– Laatutunnuksista yksinpuintulkinnalla on arvioitu elävän latvuksen alarajan ja kuivaokсарajan korkeutta. Maltamo ym. (2009) saivat latvusrajan tarkkuudeksi 0,79 m (7,13 %) ja kuivaokсарajan tarkkuudeksi 1,26 m (25,2 %). Vauhkonen ym. (2013a) tutkimuksessa latvusrajan tarkkuus oli 1,8 m (18 %) ja kuivaokсарajan 2,8–3,7 (85–112 %). Maltamon ym. (2012) tutkimuksessa, jossa testattiin ALS-ennusteiden kalibrointia paikallisen maastoaineiston avulla, nimenomaan kuivaokсарajan mallintaminen oli haastavinta, mutta mallien ennusteet paranivat testatuista tunnuksista eniten (RMSE 2,1 m → 1,4 m) muutaman metsikkökohtaisen mitatun puun avulla.

3.4 Metsikkötason tunnuksset

Puiden löytymättä jääminen ja mahdolliset virheet puutunnusten ennustuksessa vaikuttavat metsikkötason tuloksiin, jotka ovat yleensä aliarvioita. Korpela ym. (2007) esimerkiksi testasivat yksinpuintulkinta-menetelmää noin 57 hehtaarin laajuisen metsäalueen inventointiin. Koko alueen puuston tilavuus oli noin 19 % aliarvio. Läpimitan ennustamisessa todettiin myös systemaattista virhettä, joka vaikutti puutavaralajien ennustamistarkkuuteen. Myöhemmät tutkimukset ovat kuitenkin raportoineet parempia tuloksia, kun tulkinta on kohdistettu varttuneisiin / hakkuukypsiin metsiköihin (esim. Peuhkurinen ym. 2007).

Peuhkurinen ym. (2007) raportoivat käytetyn yksinpuintulkinnan ja malliketjun tuottaneen hakkuukone-mittausta lähimmän tuloksen kahdella päätehakkuuleimikolla, kun vertailussa oli mukana esim. aluepohjainen tulkinta ja kuvioittainen arviointi. Puiden lukumäärän ennuste oli noin 3–20 %:n aliarvio, mutta tukkiosuuden tilavuuden ennuste poikkesi molemmilla leimikoilla alle 1 % hakkuukonemittauksesta. Holmgren ym. (2012) käyttivät hakkuukoneella mitattuja runkokäyriä yksinpuintulkinnan opetusaineistona ja raportoivat 25 m³/ha (10,58 %) virheen alikuviotason kokonaistilavuuden ennustuksessa. Tilavuuden ennuste oli harhaton.

Vauhkonen ym. (2013a) kuvasivat kaksivaiheisen päätöstukimenetelmän leimikoiden valintaan. Ensimmäisessä vaiheessa hakkuukypsien leimikoiden sijainti kartoitettiin harvapulssisen laserkeilausaineiston (onnistumisprosentti 95 %) ja toisessa vaiheessa tunnistetuille leimikoille tuotettiin puu- ja metsikkötunnukset käyttämällä tiheämpää (12 pulssia / m²) laserkeilausaineistoa ja yksinpuintulkintaa. Kokonaistilavuuden RMSE oli 32,5 m³/ha (16,5 %) suurilla (400–900 m²) koealoilla arvioituna ja puulajeittaisten runkolukusarjojen virheindeksit (vrt. osio 2,2) olivat esim. Packalénin ja Maltamon (2008) tuloksia parempia (0,09–0,23). Yksinpuintulkinnalla ja maastomittauksella ennustetuilta runkokäyriltä tuotetut kokonais- ja puulajikohtaiset tavaralajennusteet vastasivat toisiaan (kuva 1), mutta niitä ei arvioitu numeerisesti, koska kyseessä ovat pelkkään runkokäyrään perustuvat teoreettiset ennusteet.



Kuva 1. Maastossa mitattujen ja yksinpuintulkinnalla tuotettujen puutavaralajien vastaavuus (Vauhkonen ym. 2013a). X-akselilla ennustettu ja y-akselilla referenssiarvo (m³/ha) > 26 cm tukkien osuudelle (a), 15–26 cm tukkien osuudelle (b), oksattoman tyvitukin osuudelle (c), sekä männyn (d), kuusen (e) ja lehtipuun (f) > 15 cm tukkiosuudelle.

4 RUNKOLUKUSARJAN TUOTTAMINEN MAASTOLASERKEILAUKSEN AVULLA

4.1 Käytetyt aineistot

Maastolaserkeilausaineistojen resoluutio ilmaistaan usein pisteiden keskimääräisenä etäisyytenä tietyn välimatkan päässä. Kirjallisuuskatsauksessa tarkastelluissa tutkimuksissa aineistojen resoluutiot kymmenen metrin etäisyydellä keilaimesta vaihtelivat 5 mm ja 20 mm välillä:

- Liang, X., ym. 2011: 6 mm/10m
- Liang, X., ym. 2012: 6,3 mm /10 m (suodatettu tarkkuuteen 20 mm/10 m)
- Liang, X., ym. 2013: 6,3 mm /10m
- Moskal, M., Zheng, G. 2012: 5 mm/10 m
- Liang, X., Hyyppä, J. 2013: 6,3 mm/10 m
- Holopainen, M. ym. 2013: 6,3 mm/10 m

4.2 Käytetyt menetelmät

Maastolaserkeilauksessa käytetään kahta erillistä menetelmää aineiston hankinnassa. Koeala voidaan mitata joko yhdestä tai useammasta keilauspisteestä. Menetelmien keskeisimmät erot ovat pistepilvien kattavuudessa sekä datan esikäsittelyssä. Yhden keilauspisteen tekniikalla mittaukset ovat nopeita toteuttaa ja pisteaineiston esikäsittely on kevyttä, mutta puista saadaan kuvattua korkeintaan 50 % (keilaussuunta). Useamman keilauspisteen tekniikalla on mahdollista kuvata koko puu, mutta aineiston esiprosessointi vaatii erillisten keilauspisteiden pistepilvien yhdistämistä. Puiden läpimittojen mittaamisessa käytetään apuna pistepilviin tehtävää sylinterisovitusta, jolla puun rungosta heijastuneet pulssit tasoitetaan jatkuvaksi pinnaksi.

4.3 Puiden kartoitus

Maastolaserkeilausaineistosta puita voidaan kartoittaa joko automaattisesti tai manuaalisesti. Manuaalisessa kartoituksessa puut tunnistetaan visuaalisesti kolmiulotteisesta pistepilvestä. Automaattisessa tulkinnassa pistepilvestä etsitään puiden rungoista muodostuvia jatkuvia pintoja sylinterisovitusta varten. Liang ym. (2011) tutkivat automaattisen puiden kartoituksen tehokkuutta manuaaliseen verrattuna yhden keilauspisteen aineistolla. Automaattisella tulkinnalla löydettiin 85 % manuaalisella tulkinnalla löytyneistä puista. Kauimmaisat rungot sijaitsivat noin 60 metrin etäisyydellä keilaimesta. Liang ym. (2012) vertasivat automaattisesti havaittuja puita koealoilta mitattuun aineistoon. Yhdeksän koealan tutkimuksessa koealat olivat keilattu koealan keskipisteestä ja puiden havaitsemisprosentit vaihtelivat 52,5 % ja 88,9 % välillä. Keskimäärin puista löydettiin 73,5 %. Liang ja Hyyppä (2013) tarkastelivat puiden kartoittamista yksittäisten keilausten

että useasta keilauksesta yhdistettyjen pisteaineistojen avulla. Tutkimuksessa yksittäisten keilausten avulla havaittiin keskimäärin 76,4 % koealan puista (min 55,3 %, max 89,5 %) ja yhdistetyn aineiston avulla keskimäärin 95,7 % (min 91,7 % max 100 %). Holopaisen ym. (2013) tutkimuksessa ALS-, TLS- ja MLS-mittausten kartoitustarkkuutta testattiin Helsingin kaupungin virkistysmetsissä (Seurasaari). Useasta TLS-keilauksesta yhdistetystä aineistosta pystyttiin automaattisesti kartoittamaan 73,3 % testialueen puista 47 cm:n RMSE:llä.

4.4 Lämpimitan ja pituuden mittaus

Puiden läpimitta on tutkimuksissa pystytty mittaamaan pituutta luotettavammin, sillä keilauskulmasta ja -korkeudesta johtuen puiden latvojen määrittämiseen on epävarmaa. Yhden keilauksen menetelmällä toteutuksessa tutkimuksessaan Moskal ja Zheng (2012) pääsivät läpimitan osalta tulokseen, jossa automaattiset mittaukset selittivät 91,12 % läpimitan havaitusta vaihtelusta. Pituuden mittaamisessa vastaava selitysaste oli vain 57,27 %. Liang ja Hyyppä (2013) saivat tutkimuksessaan yhden keilauksen menetelmällä samansuuntaisia tuloksia. Lämpimitan mittaaminen oli huomattavasti pituuden mittaamista tarkempaa. Automaattisilla mittauksilla läpimitan RMSE koealatasolla oli välillä 0,74–2,41 cm (3,94–12,37 %) ja pituuden RMSE välillä 1,36–4,29 m (6,89–21,29 %). Samassa tutkimuksessa testattiin mittausten tarkkuutta myös usean keilauksen avulla. Tällöin läpimitan RMSE koalatasolla oli välillä 0,9–1,9 cm (5,16–9,87 %) ja pituuden vastaavasti välillä 2,04–6,53 m (12,47–34,11 %). Liang, ym. (2013) esittelivät automaattisen menetelmän runkokäyrän mittaamiselle TLS-pisteilvestä. Automaattisen runkokäyrämenetelmän avulla läpimitta mitattiin tutkimuksessa tarkemmin kuin manuaalisilla menetelmillä. Menetelmän tarkkuus (RMSE) oli männylle ja kuuselle keskimäärin 0,82 cm.

II SUOSITUS INVENTOINTIKETJUUKSI

5 SUOSITUS INVENTOINTIKETJUUKSI AIEMPIEN TULOSTEN PERUSTEELLA

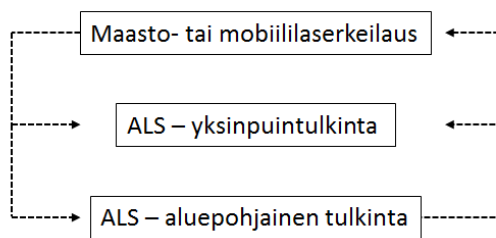
Yhteenvetona aiemmista tuloksista voidaan todeta, että realististen, puula- jikohtaisten runkolukusarjojen tuottaminen onnistuu sekä ilmasta että maasta hankituilla lasermittauksilla. Ilmasta hankittujen aineistojen osalta tulkinta onnistuu parhaiten varttuneilla ja hakkuukypsillä kohteilla valta- puuston (päälatvuserroksen) osalta. Toisaalta tulkinnan laatu riippuu maastoreferenssidatan laadusta ja kattavuudesta. Maastolaser-keilauksella tuotetut mittaukset ovat olleet poikkeuksetta tarkempia kuin ilmasta tuo- tetut, mutta toisaalta tuotettu tieto on pistemäistä eikä koko kartoitusalu- een kattavaa, kuten ilmasta hankittujen aineistojen tapauksessa. Puuston laatutunnusten osalta molemmilta aineistoilta on mahdollista tuottaa puun ulkoista laatua kuvaavia tunnuksia (esim. oksarajat).

Maanmittauslaitoksen hankkima harvapulssinen (esim. 0,5 pulssia/m²), lehdettömään aikaan keilattu aineisto tulee olemaan saatavilla koko maas- ta ja se soveltuu myös metsätulkintoihin vastaavalla tavalla kuin lehdelli- seen aikaan hankittu (Villikka ym. 2012). Näin ollen aluepohjaisen metsäva- ratiedon tuottaminen on järkevintä perustaa tähän aineistoon tai vastaa- viin Metsäkeskuksen aineistoihin. Runkolukusarjojen tuottaminen on tar- kinta ei-parametrisilla, esim. k-MSN-tyyppisillä tekniikoilla, jotka vaativat ilmasta hankittujen aineistojen lisäksi maastoreferenssiaineistoa (Packalén & Maltamo 2008). ALS-aineistoihin perustuva yksinpuintulkinta lienee ny- kyisellä hintatasolla järkevintä lähinnä erikoiskohteista (laajat, taloudelli- sesti arvokkaat puustot).

Edellä esitetyn perusteella visiomme on, että maasto- ja tulevaisuudessa mobiililaserkeilausdataa (MLS) voidaan käyttää ilmasta tuotettujen ennus- teiden täydentämisessä ja/tai tarkentamisessa (kts. kuva 2). TLS-tekniikkaa on mahdollista soveltaa toisaalta aluepohjaisessa tulkinnassa tarvittavan maastoreferenssiaineiston hankintaan ja toisaalta tehdyn tulkinnan tarken- tamiseen esim. leimikkokohtaisilla puuston määrän ja laadun mittauksilla. Nykyisellään erilaisten laseraineistojen roolia ja erityisesti niiden yhdistel- män käyttöä operationaalisessa inventointisovelluksessa ei ole kuitenkaan tutkittu.

Lasermittausten
käyttö maasto-
referenssidatan
hankinnassa

→ Puutason
määrä- ja
laatatiedon
yleistäminen
aluetasolle



Lasermittausten
käyttö leimikon
ennakko-
mittauksessa

→ Aluepohjaisen
tiedon tarkenta-
minen?

Kuva 2. Visio erilaisten laserkeilausmenetelmien yhdistämisestä metsä- ja leimikkosuunnittelussa.

Kuvan 2 visiota testattiin tutkimuksessa, jossa selvitimme ALS- ja TLS-menetelmien ja niiden yhdistelmän käytön tarkkuutta puuston runkolukusarjan ennustamisessa ja vertasimme saatuja tuloksia hakkuukoneaineistoon. Tutkimus esitellään seuraavassa osiossa (Käytännön testi).

III KÄYTÄNNÖN TESTI

6 TAVOITE

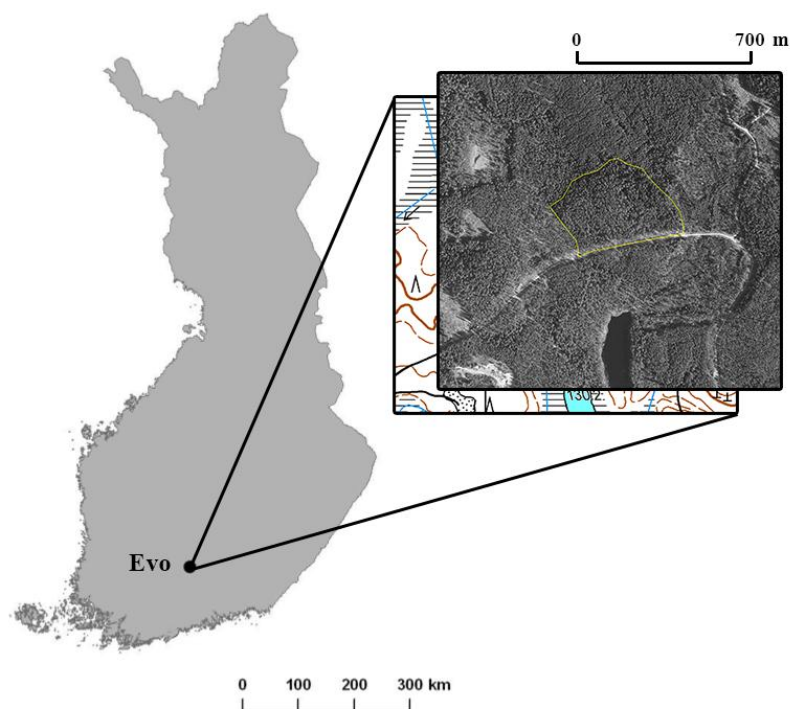
Tutkimuksessa selvitettiin eri laserkeilausmenetelmien ja niiden yhdistelmän hyödyntämismahdollisuuksia tarkan runkolukusarjan, puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ja puun laadun ennustamisessa.

Tulokset on raportoitu puutasolla.

7 AINEISTOT JA MENETELMÄT

7.1 Kohdealue ja maastomittaukset

Testialue (kuva 3) sijaitsi Evolla, Etelä-Suomessa (61.19°N, 25.11°E). Evon alueella on kokonaisuudessaan noin 2000 hehtaaria pääasiassa hoidettua talousmetsää. Esiselvityksessä käytetty päätehakkuuleimikko oli pinta-alaltaan noin 2,5 hehtaaria ja kasvupaikkatyypiltään tuore kangas (MT). Pääpuulaji oli mänty, mutta osassa aluetta oli myös vahva aluskasvukuusikko. Puuston keski-ikä oli noin 75 vuotta ja kohteen metsänhoidollisiin toimenpiteisiin kuuluivat muun muassa harvennukset sekä lannoitukset kahteen eri otteeseen. Leimikolta valittiin satunnaisesti 200 puuta, joille määritettiin rinnankorkeusläpimitta, pituus, oksarajat sekä laatu. Taulukko 1 sisältää tarkemmat keskitunnukset päätehakkuuleimikolle.



Kuva 3. Testialue.

Taulukko 1. Maastomittauksia kuvaavat tilastolliset tunnuksset. Lyhenteet: Rinnankorkeusläpimitta (DBH), puun pituus (H), yläläpimitta (6 metrin korkeudelta) (D6), elävä oksaraja (LB), kuollut oksaraja (DB) ja puiden tilavuus (V).

	Min	Keskiarvo	Max	Keskihajonta
DBH, mm	182,5	298,0	410,0	44,4
D6, mm	130,0	242,9	350,0	41,3
H, m	19,0	24,7	28,6	1,6
LB, m	6,7	14,5	18,3	2,0
DB, m	2,3	5,2	14,7	2,1
V, dm ³	241,8	815,2	1549,4	260,3

Laatuluokitus määritettiin VMI:ssä käytettävien laatuluokkien mukaan seuraavasti: **(5)** Hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 (oksaton tyvitukki) olevan tukin ja tukkikokoisesta rungon osasta vähintään 80 % on tukkia. **(6)** Vikainen hyvä tukkipuu. Puu sisältää laatuluokkaa 1 olevan tukin, mutta tukkikokoisesta rungon osasta on alle 80 % tukkia. **(7)** Tukkipuu. Puun tukkikokoisesta osasta vähintään 80 % on tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa. **(8)** Vikainen tukkipuu. Puun tukkikokoisesta osasta on alle 80 % tukkia. Puu ei sisällä laatuluokkaa 1 olevaa osaa. **(9)** Iso kuitupuu. Puu on tukkikokoinen, mutta vikojen tai teknisen laadun vuoksi ainakin toistaiseksi kuitupuu.



Kuva 4. Kuvia kohteelta ja merkinnöistä puissa.

7.2 Lentolaserkeilaus

Lentolaserkeilausaineistot oli mitattu vuosina 2011 ja 2012. Vuoden 2011 aineisto oli tiheäpulssista aineistoa (n. 10 pulssia / m²), kun vuoden 2012 aineisto oli Maanmittauslaitoksen (MML) mittaamaa harvapulssista aineistoa (n. 0,8 pulssia / m²). Aineistojen käsittely koostui seuraavista vaiheista: (1) Maastopintamallin (DTM) muodostaminen 1 metrin solukoolla ja kasvillisuuden pintamallin (DSM) muodostaminen 0,5 metrin solukoolla. (2) Latvuspintamalli laskettiin tämän jälkeen DSM:n ja DTM:n erotuksena. (3) Yksinpuintulkinta tehtiin segmentoimalla muodostettuja CHM:ä (menetelmät on kuvattu tarkemmin seuraavissa julkaisuissa: Yu, ym. 2011 ja Vastaranta ym. 2012).

Puustotunnukset ennustettiin löydetyille puille perustuen lentolaserkeilauksesta mitattuun pituuteen. Rinnankorkeusläpimitta ennustettiin käyttämällä Kalliovirran ja Tokolan (2005) läpimittamalleja, jotka hyödyntävät puun pituutta ja latvuksen leveyttä. Mallien tarkkuutta parannettiin kohdealueella sovittamalla mallit kyseisen alueen puustoon referenssimittausten avulla.

7.3 Maastolaserkeilaus

Maastolaserkeilausaineisto mitattiin Leican HDS6100 maastolaserkeilaimella (Leica Geosystem AG, Heerbrugg, Sveitsi) (kuva 5). Laitteen suurin mittausetäisyys on 79 metriä ja katselukulma on 360° x 310°. Etäisyysmittaustarkkuus on 25 metrin säteellä +/- 2 millimetriä. 10 metrin etäisyydeltä keilauspisteestä pisteitä mitataan 6,3 millimetrin välein. Pistepilven mittaus yhdestä keilauspisteestä kesti noin 3,5 minuuttia. Kokonaisuudessaan päätehakkuuleimikolta mitattiin 45 erillistä keilauspistettä neljässä eri ryhmässä. Ryhmien sisällä pistepilvet sovitettiin yhteen alueelle jaoteltujen tähyssipallojen (kuva 6) avulla. Aineisto sidottiin myös ulkoiseen koordinaattijärjestelmään (EUREF-FIN). Rekisteröintivirhe ryhmien sisällä on tyypillisesti 1–3 millimetriä.



Kuva 5. Leica HDS6100 maastolaserkeilain.



Kuva 6. Tähyspallo.

Yksittäiset puut irrotettiin manuaalisesti pistepilvistä 3D-rajauksella. Yksittäisen puun pisteaineistot koostuivat 1–3 eri keilaussuunnasta saaduista pistehavainnoista. Tämän jälkeen jokaiselle puulle mitattiin manuaalisesti 3D-pistepilveä hyödyntäen pituus, rinnankorkeusläpimitta, yläläpimitta ja oksarajat.

7.4 Hakkuukonemittaukset

Hakkuukonemittaukset tehtiin vuoden 2012 syksyllä. Jokainen maastomittauksien yhteydessä valittu puu kaadettiin ja pätkittiin tukki- ja kuituosiin. Mittaustiedot yhdistettiin hakkuun yhteydessä maastomittauksiin tarkasti. Seuraavat tunnuksot tallennettiin hakkuukoneelta: DBH, tukki- ja kuitutilavuus sekä tukki- ja kuiturajat. Taulukossa 2 on esitetty mittaustiedot tarkemmin.

Taulukko 2. Yhteenveto hakkuukonemittauksista.

	Min	Keskiarvo	Max	Keskihajonta
DBH, mm	158,0	290,6	399,0	44,4
Tukkitilavuus, dm ³	0,0	695,1	1531,9	268,4
Kuitutilavuus, dm ³	0,0	117,7	914,8	113,3
Kokonaistilavuus, dm ³	185,3	809,3	1588,4	255,0

7.5 Puutavaralajien ennustaminen

Tukki- ja kuitutilavuudet ennustettiin eri laserkeilausmenetelmillä hyödyntäen Laasasenahon runkokäyrämalleja (1982). Tukki- ja kuitutilavuudet ennustettiin viidellä eri menetelmällä: 1) maastomittaukset, 2) maastolasermittaukset (TLS), 3) maastolaser- ja lentolaserkeilaus (tiheäpulsinen) yhdistelmä (TALS), 4) tiheäpulsinen lentolaserkeilaus (ALS_{high}) ja 5) harva-pulsinen lentolaserkeilaus (ALS_{low}). Taulukossa 3 on yhteenveto käytetyistä menetelmistä. Puutavaralajien ennustamisessa tukin yläläpimittaraja oli 15 cm ja kuidun 7 cm.

Taulukko 3. Yhteenveto käytetyistä menetelmistä.

Menetelmä	Runkokäyrä (DBH, H)	Runkokäyrä (DBH, D6, H)
Maastomittaukset		x
TLS		x
TALS		x
ALS _{high}	x	
ALS _{low}	x	

7.6 Laadun ennustaminen

Laatu ennustettiin ei-parametrisella lähimmän naapurin menetelmällä, jossa laatuluokka oli selitettävänä tunnuksena ja selittäjinä käytettiin maastossa tai TLS:stä mitattuja tunnuksia puille. Lähimpien naapureiden etsinnässä käytettiin Random forest -menetelmää. Menetelmä on esitelty tarkemmin julkaisussa Cookston ja Finley (2007).

8 TULOKSET

8.1 Pituus

Puiden pituus mitattiin tarkimmin tiheäpulssisella lentolaserkeilauksella (ALS_{high}). Pituuden RMSE oli 1,24 metriä. Harvapulssisen lentolaserkeilauksen (ALS_{low}) pituusestimaatin tarkkuus oli selkeästi heikompi (RMSE 3.20 metriä). Maastolaserkeilauksesta mitatun pituuden tarkkuus oli 1,99 metriä (RMSE). Taulukossa 4 on yhteenveto pituuden tarkkuuksista eri laserkeilausmenetelmille. Kaikki laserkeilausmenetelmät aliarvioivat puuston pituutta.

Taulukko 4. Pituuden mittaustarkkuus eri laserkeilausmenetelmillä.

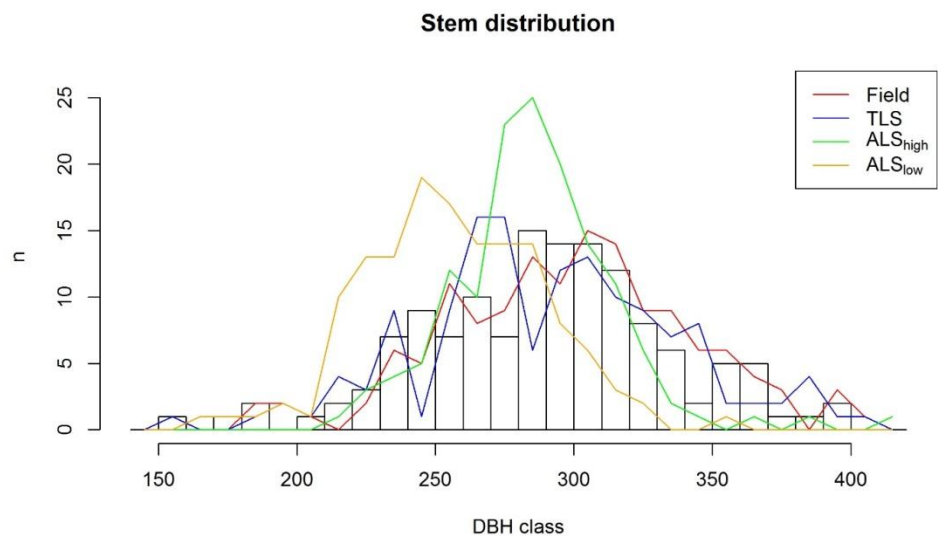
	Harha, m	Harha%	RMSE, m	RMSE%
TLS	1,64	6,60	1,99	8,03
ALS _{high}	0,92	3,70	1,24	5,00
ALS _{low}	2,90	11,70	3,20	12,91

8.2 Läpimitta ja runkolukusarja

Yksittäisen puun tasolla perinteiset maastomittaukset sekä maastolasermittaukset tuottivat tarkimman ennusteen puiden läpimitalle. Läpimittatarkkuus maastomittauksissa oli 10,4 millimetriä. Laserkeilausmenetelmistä maastolaserkeilaus oli selkeästi tarkin. Maastolaserkeilauksella läpimitan mittausrvirhe oli 17,3 millimetriä. ALS-tulkinnalla tuotettu läpimitta oli harhainen, johtuen käytetystä mallista sekä puuston vaihtelevasta läpimittapituus-suhteesta. Runkolukusarja (Kuva 5) laskettiin puutasolla neljällä eri menetelmällä: 1) Maastomittaukset (Field), 2) maastolasermittaukset (TLS), 3) lentolaserkeilaus, tiheäpulssinen (ALS_{high}) ja 4) lentolaserkeilaus, harvapulssinen (ALS_{low}). Referenssinä käytettiin hakkuukonemittauksia.

Taulukko 5. Läpimitan mittaustarkkuus.

	Harha, mm	Harha%	RMSE, mm	RMSE%
Maastomittaus	-7,8	-2,7	10,4	3,6
TLS	-1,4	-0,5	17,3	5,9
ALS _{high}	4,6	1,6	38,9	13,4
ALS _{low}	33,8	11,6	52,2	18,0



Kuva 7. Kuvaajassa on esitetty eri menetelmillä (viivat) tuotetut puutason runkolukusarjat verrattuna hakkuukoneella (pylväät) mitattuun runkolukusarjaan.

8.3 Puutavaralajit

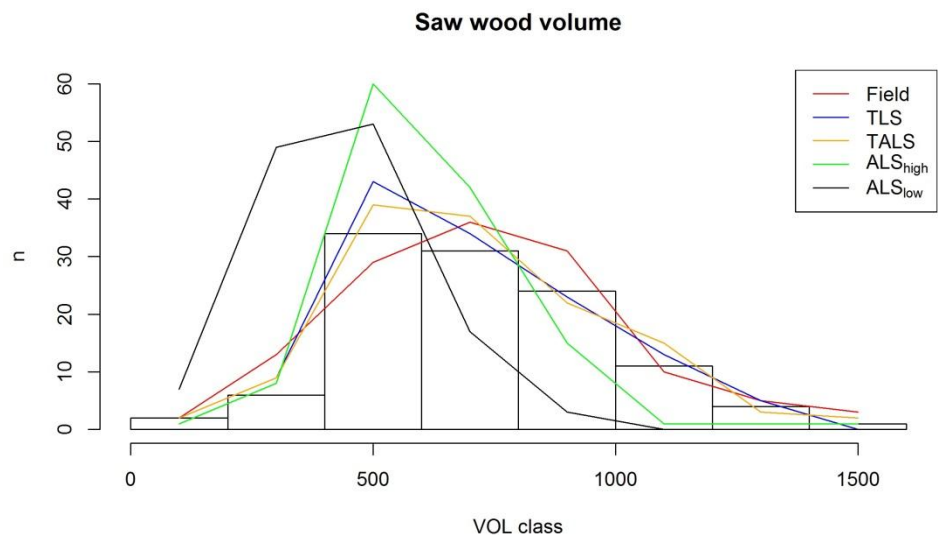
Puutason tukki- ja kuitutilavuuksien ennustaminen (kuvat 8 ja 9) tehtiin viidellä eri menetelmällä: maastomittaukset, TLS, TLS:n ja ALS:n (tiheäpulsinen) yhdistelmä (TALS) sekä kahdella eri ALS-aineistolla. Lupaavimmat laserkeilausmenetelmät tukkitilavuuden ennustamiseen olivat TALS sekä TLS. Kokonaistilavuus puutasolla ennustettiin TLS:llä 17,8 % ja TALS:lla 16,9 % tarkkuudella. Tukkitilavuus vastaavasti 17,5 % ja 16,8 % tarkkuudella. Kuidun määrää puolestaan aliarvioitiin selkeästi verrattuna hakkuukonemittauksiin. Tämä johtui pääasiassa eroista apteerauksessa sekä puun laadun vaikutuksesta apteeraukseen. Taulukoissa 6 ja 7 on esitetty kokonaistilavuuden ja puutavaralajikohtaiset tilavuudet yksityiskohtaisemmin.

Taulukko 6. Kokonaistilavuuden tarkkuus.

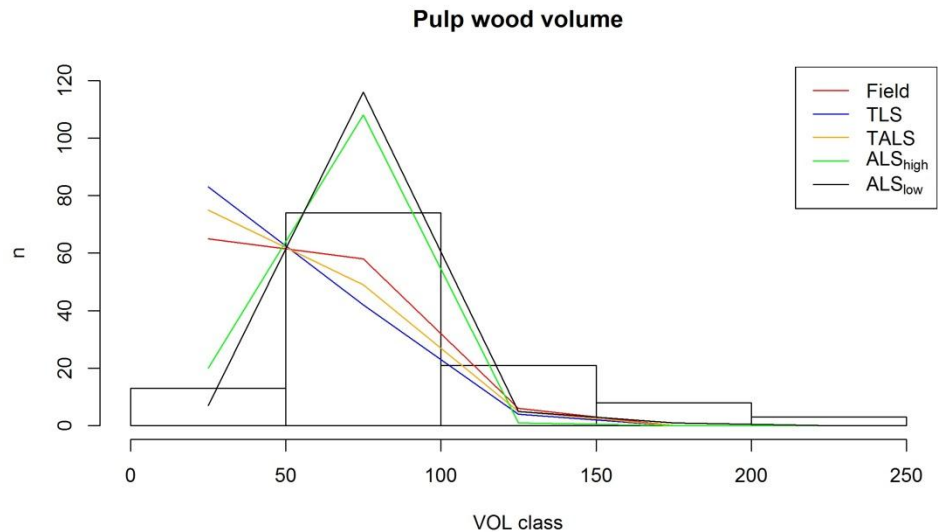
	Harha	Harha%	RMSE	RMSE%
Maastomittaukset	39,6	4,9	81,4	10,1
TLS	72,3	8,9	143,8	17,8
TALS	60,2	7,4	136,6	16,9
ALS _{high}	152,0	18,8	269,0	33,2
ALS _{low}	306,9	37,9	378,3	46,7

Taulukko 7. Puutavaralajitilavuuksien tarkkuus.

	Tukkitilavuus, dm ³				Kuitutilavuus, dm ³			
	Harha	Harha%	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%	RMSE	RMSE %
Maastomittaukset	-8,9	-1,2	103,6	14,4	33,4	37,0	51,9	57,6
TLS	21,0	2,9	125,8	17,5	38,3	42,4	54,2	60,1
TALS	9,2	1,3	120,8	16,8	37,3	41,4	53,5	59,3
ALS _{high}	110,8	15,4	250,1	34,7	32,9	36,5	51,5	57,1
ALS _{low}	279,3	38,8	354,8	49,2	25,7	28,6	49,4	54,8



Kuva 8. Tukkitilavuusjakauma.



Kuva 9. Kuitutilavuusjakauma.

8.4 Puun laadun ennustaminen

Puiden laadun ennustamistarkkuus selvitettiin maastomittausten ja TLS:n avulla. Tärkein tunnus laadun ennustamisessa oli alimman kuolleen oksan korkeus. Tämän tiedon avulla laatuluokitus VMI:ssä käytettäviin viiteen eri laatuluokkaan onnistui 86 % tarkkuudella maastomittausten avulla ja 75 % tarkkuudella TLS:n avulla. TLS:n heikompi tulos johtui virheestä alimman kuivan oksan korkeuden mittaamisessa, jota systemaattisesti hieman yliarvioitiin, jolloin myös laatuluokka yliarvioitiin.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Eri laserkeilausmenetelmien käyttöä puustotunnusten mittaamisessa yksittäisen puun tasolla on tutkittu tiiviisti viimeisen vuosikymmenen aikana. Yksittäisen puun mittaamisessa erityisen tärkeässä roolissa on puiden löytäminen sekä se, millä menetelmällä puustotunnuksia mitataan. Lentolaserkeilauksen avulla on mahdollista mitata puuston pituus tarkasti, jonka jälkeen puun läpimitta mallinnetaan olemassa olevilla malleilla. Maastolaserkeilaus puolestaan mahdollistaa puun läpimitan "fyysisen" mittaamisen pistepilvestä ilman mallinnusta. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri laserkeilausmenetelmien tarkkuus runkolukusarjan, puutavaralajikohtaisten tilavuuksien sekä puun laadun ennustamisessa. Tutkimuksessa myös selvitettiin mahdollisuus yhdistää eri laserkeilausaineistoja. Laserkeilausaineistojen yhdistämisessä haasteena on yksittäisten puiden paikannustarkkuus. Lentolaserkeilauksesta puun sijainti mitataan latvuston korkeimmalle kohdalle tai segmentin keskikohdalle, kun taas maastolaserkeilauksessa sijainti mitataan normaalisti rinnankorkeudelle.

Puiden pituus aliarvioitiin järjestelmällisesti kaikilla menetelmillä. Tiheäpulsinen lentolaserkeilaus tuotti tarkimman estimaatin. Maastolaserkeilauksessa pituuden mittaamiseen vaikutti paljon keilauspisteen sijainti verrattuna kohdepuuhun, koska läheltä mitattaessa puun latvan yläosasta ei tule pisteitä aineistoon. Läpimitta ennustettiin puolestaan tarkimmin maastolaserkeilauksella. Läpimitan mittaustarkkuus oli samalla tasolla kuin mitä aikaisemmissa tutkimuksissa on raportoitu. Läpimitan tarkkuus on aikaisemmissa julkaisuissa vaihdellut noin 1–2 senttimetrin välillä riippuen mittausten menetelmästä. Läpimittatarkkuutta TLS-aineistosta on vielä mahdollista tarkentaa, koska tässä tutkimuksessa mittaukset tehtiin manuaalisesta ja esimerkiksi Liang ym. (2013) tutkimuksessa kehitetyllä automaattisella runkokäyrämenetelmällä läpimittatarkkuus oli jopa alle 1 senttimetrin luokkaa.

Tutkimuksessa saadut tulokset puutason runkolukusarjan mittaamisessa ovat lupaavia erityisesti maastolaserkeilauksen osalta. Maastolaserkeilaus ja perinteiset maastomittaukset tuottivat tarkimmat runkolukusarjat verrattuna hakkuukonemittauksiin. Lentolaserkeilaus puolestaan yliarvioi tiettyjä läpimittaluokkia, johtuen käytetystä läpimittamallista. Mallin avulla ei päästy riittävän tarkasti kiinni kohteella olleeseen pituusläpimittavaihteluun.

Lentolaserkeilauksen osalta mielenkiintoista oli myös harvapulssisen (ALS_{low}) laserkeilauksen huonot tulokset. Harvapulssinen aineisto soveltuu aluepohjaiseen tulkintaan, mutta tässä tapauksessa myös harvapulssisen aineiston perusteella tehtiin puutason tulkinta samoille puusegmenteille, mitkä oli määritetty tiheäpulsin aineiston (ALS_{high}) perusteella. Näin ollen voidaan todeta, ettei käytetty MML:n harvapulssinen ALS-aineisto soveltunut puutason tulkintaan.

Puutavaralajikohtaiset tilavuudet ennustettiin hyödyntäen olemassa olevia runkokäyrämalleja. Perinteisten maastomittausten ja maastolaserkeilauksen avulla voitiin hyödyntää tarkennettua runkokäyrämallia, joka käytti rinnankorkeusläpimittaa, yläläpimittaa sekä puun pituutta runkokäyrän muodostamisessa. Lentolaserkeilauksesta yläläpimittaa ei ollut mahdollista mitata. Tulokset osoittivat, että maastolasermittaukset sekä sen yhdistäminen tiheäpulsiseen lentolaserkeilaukseen mahdollistavat tarkan puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ennustamisen. Erityisesti tukkitilavuuden ennustustarkkuus oli lupaava. Kuitutilavuutta aliarvioitiin johtuen kuiturajan korkeudessa olevasta virheestä verrattuna hakkuukoneeseen sekä laadullisista syistä. Tutkimusaineistossa osa tukkipuusta oli apteerattu hakkuukoneella kuiduksi johtuen tukin oksaisuudesta.

Kokonaistilavuus ennustettiin samalla tarkkuustasolla tai tarkemmin kuin aiemmissa tutkimuksissa. Tarkemmat tulokset on raportoitu aikaisemmin Liang ym. (2013) sekä Maltamo ym. (2009) artikkeleissa. Liang ym. (2013) käyttivät automaattista runkokäyrän mittausten menetelmää maastolaserkei-

lauksella mitatusta pistepilvestä. Kokonaistilavuuden tarkkuus oli tutkimuksessa alle 10 %. Maltamo ym. (2009) selvittivät kokonaistilavuuden ennustustarkkuutta 133 puulle. Kokonaistilavuus ennustettiin tutkimuksessa ei-parametrisella k-MSN menetelmällä ja lentolaserkeilauksesta irrotetuilla piirteillä. Kokonaistilavuus ennustettiin 11 % tarkkuudella. Erot näiden tutkimusten tuloksiin johtuvat todennäköisesti eroista laskennassa ja referenssimittauksissa. Esimerkiksi Maltamo ym. (2009) käyttivät referenssinä kokonaistilavuudelle mallilla laskettua tilavuutta, kun tässä tutkimuksessa käytettiin hakkuukoneen mittaamaa kokonaistilavuutta.

Puiden laatuluokitus tehtiin Random forest -menetelmällä. Laatuluokitus onnistui maastomittausten avulla tarkemmin kuin maastolaserkeilauksen avulla. Tämä johtui pääasiassa alimman kuolleen oksan korkeuden mittaauksessa olleesta virheestä. Maastolaserkeilaus yliarvioi alimman kuolleen oksan korkeutta, johtuen pistepilven kattavuuden ja alimman oksan löytämisen vaikeudesta erityisesti leimikon osissa, joissa oli heikompi näkyvyys. Alimman kuolleen oksan korkeus oli tärkein tunnus laatuluokituksen tekemisessä. Sen avulla hyvän ja huonon laatuluokan erottelu oli mahdollista tarkasti. Luokittelu vaikeutui, kun vertailtiin esimerkiksi VMI-luokkien 6 ja 7 eroja, joissa kuolleen oksarajan korkeudessa ei ollut merkittäviä eroja. Tämän vuoksi uusia latvustoa kuvaavia tunnuksia tulisi edelleen kehittää ja tutkia, jotta nämä luokat erottuisivat selkeämmin toisistaan.

10 YHTEENVETO

Tutkimuksessa selvitettiin eri laserkeilausmenetelmien ja niiden yhdistelmän hyödyntämismahdollisuuksia tarkan runkolukusarjan, puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ja puun laadun ennustamisessa. Tulokset osoittivat että maastolaserkeilausmenetelmä sekä maastolaserkeilauksen ja tiheäpulsseen lentolaserkeilauksen yhdistelmä mahdollistivat tarkan puutason puutavaralajikohtaisten tilavuuksien ennustamisen. Erityisesti tukkitilavuus ennustettiin tarkasti. Kuitutilavuuden ennustamisessa esiintyi aliarviota, johtuen laadullisista syistä. Esiselvityksessä käytetty apteerausmenetelmä ei käyttänyt laatuominaisuuksia aputietona. Yksi tärkeä jatkotutkimusaihe onkin uuden apteerausmenetelmän kehittäminen, joka hyödyntäisi tarkkaa runkokäyrää ja tukkiosan oksajakaumaa tukki- ja kuituosuuksia laskettaessa. Maastolaserkeilauksen kustannustehokkuus tulisi myös selvittää verrattuna perinteisiin maastomittauksiin tarkan referenssitiedon tuottamisessa.

Tutkimuksessa saadut tulokset ja kehitetyt menetelmät tullaan esittelemään yksityiskohtaisemmin kahdessa erillisessä tutkimusartikkelissa, jotka valmistuvat kuluvan vuoden aikana.

IV ESISELVITYKSEN PÄÄTELMÄT

11 SUOSITUS INVENTOINTIMENETELMÄKSI

Suositus inventointimenetelmäksi sekä visio erilaisten lasermittausten yhdistämiseksi metsä- ja leimikkosuunnittelussa on esitetty kappaleessa 5 kuvassa 2.

”Käytännön testi” -osion tulokset osoittivat Kuvassa 2 esitetyn vision potentiaalin, eli että maastolaserkeilauksella sekä maastolaserkeilauksen ja tiheäpulsseisen lentolaserkeilauksen yhdistelmällä on mahdollista tarkentaa runkolukusarjan ennustamista sekä puun laatu- ja kasvutunnuksien estimointia uudistuskypsässä männikössä. Sen sijaan harvapulssinen lentolaserkeilaus ei soveltunut puutason tulkintaan. Näin ollen yksi esiselvityksen päätelmä on, että puutason tulkinta vaatii korkeampaa pulssitiheyttä kuin 0,8 pulssia/m², eli MML:n harvapulssinen ALS-aineisto ei sovellu puutason tulkintaan. Aiempien tutkimusten perusteella minimipulssitiheys yksinpuintulkintaan on (tutkimuksesta riippuen) 2–6 pulssia/m².

Esiselvityksen käytännön testin tuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että kyseessä oli uudistuskypsä metsä. Kuten aiemmissa tutkimuksissa on todettu, yksinpuintulkinta tuskin tulee kyseeseen kaikissa kehitysluokissa: mitä tiheämpää ja useampijaksoisempaa puusto on sitä huonompi tulos. Myös maastolaserkeilauksessa puuston tiheys ja ennen kaikkea alikasvos (pienet puut, pensaat, oksat) vaikuttaa merkittävästi menetelmien tarkkuuteen ja hyödyntämismahdollisuuksiin.

Esiselvityksen käytännön testi perustui maastolaserkeilauksen osalta jalustalle asetettavaan keilaimeen. Tulevaisuudessa mielenkiintoinen mahdollisuus on ns. stop-and-go -MLS-mittaus, jolloin puiden löytyminen ja mitaustarkkuus paranisi verrattuna yhden keilauspisteen TLS-mittaukseen. Potentiaalisia alustoja MLS-mittaukselle ovat reppu, moottorikelkka, mönkijä tai hakkuukone. ALS-/MLS- ja hakkuukonemittausten tehokas yhdistäminen on yksi tulevaisuuden visioistamme, mutta todennäköisesti TLS:n/MLS:n hyödyntäminen operatiivisessa koealojen tai leimikoiden mitauksessa on kehityksen ensimmäinen vaihe.

Käytännön toteutuksen kannalta keskeinen kysymys on eri toimijoiden roolin määrittely. Toisin sanoen mikä on Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon rooli (onko se metsäyhtiöiden käytettävissä)? Kuinka hyödyntää VMI-koealamittauksia? VMI-monilähdeinventoinnin tulevaisuus? MML:n laserkeilausaineistojen hyödyntäminen? Muiden toimijoiden (esim. Mavi, konsultit) rooli? Periaatteessa edellä kuvatuilla menetelmillä voisi olla mahdollista tarkentaa Suomen metsäkeskuksen metsävaratietoa sille tasolle, että se olisi käyttökelpoista metsäyhtiöiden puunhankintaan ilman erillisiä maastokäyntejä. Toinen vaihtoehto voisi olla maastolaserkeilaukseen

perustuva leimikoiden ennakkomittaus, jota konsultti voisi metsäyhtiöille tehdä samaan tapaan kuin nykyisin konsultit hoitavat lentolaserkeilaukseen perustuvaa inventointia.

12 MENETELMIEN KUSTANNUKSET

Lentolaserkeilausmenetelmien kustannukset ovat riippuvaisia inventoitavan alueen koosta, pulssitiheydestä sekä käytettävän maastoreferenssin laajuudesta. Lisäksi kustannuksiin vaikuttaa, käytetäänkö inventoinnissa myös ilmakuvia. Arvio lentolaserkeilaukseen perustuvan tulkinnan kustannuksista laajoja alueita (satojatuhansia hehtaareja) kuvattaessa:

- Lentolaserkeilausaineisto
 - Harvapulssinen (alle 1 pulssia/ha, aluepohjainen menetelmä) – 0,3 €/ha
 - Tiheäpulssinen (5 pulssia/ha, yksinpuintulkinta) – 0,6 €/ha
- Ilmakuva-aineisto – 0,2 €/ha
- Maastoreferenssi – 1–3 €/ha
- Tulkinta – 0,5–1 €/ha

Aluepohjainen inventointimenetelmä on siis lentolaserkeilausaineiston osalta huomattavasti halvempaa kuin yksinpuintulkinta, joka vaatii korkeampaa pulssitiheyttä. Toisaalta maastoreferenssin tarve on yksinpuintulkinnassa pienempi kuin aluepohjaisessa menetelmässä.

Suomen Metsäkeskuksen mukaan lentolaserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuvan aluepohjaisen metsäsuunnitteluinventoinnin kokonaiskustannukset ovat tällä hetkellä (2013) 4 €/ha.

Maastolaserkeilauksen osalta kustannustehokkuuden arviointi on yksi keskeisistä tulevaisuuden tutkimusaiheista.

13 KESKEISET JATKOTUTKIMUKSET

Visionamme on, että tulevaisuudessa erilaiset laserkeilausmenetelmät ja niiden yhdistäminen hakkuukonemittauksiin tulee mahdollistamaan ns. täsmämetsätalouden (kts. Holopainen & Hyyppä 2009, Holopainen ym. 2011), eli tarkan metsävaratiedon hyödyntämisen kaikilla metsätalouden osaluilla. Tämä kehitys tulee mullistamaan operatiivisen metsäsuunnittelun, leimikkosuunnittelun ja valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) nykykäytännöt sekä tuottamaan merkittäviä kustannussäästöjä sekä lisäarvoa puun jalostusketjussa. Tällöin tärkeitä tutkimusaiheita ovat mm. TLS- ja MLS-mittaukset koealojen ja leimikoiden mittauksessa: operatiivisten menetelmien kehittäminen ja kustannustehokkuuden tarkastelu, TLS-/MLS-/ALS- ja hakkuukonemittausten yhdistäminen, puiden paikannustarkkuuden (GPS-imu)

parantaminen, tukin todellisen laadun (saheet / röntgenmittaukset tehtaalla) mittaaminen laserkeilauksella, ALS-aineiston pulssitiheyden merkityksen tarkempi selvittäminen sekä uusien sensorien (aaltomuoto-LiDAR, hyperspektri-LiDAR, Vauhkonen ym. 2013b) hyödyntäminen runkolukusarjan enustamisessa ja puulajitulkinnassa. Lisäksi tulevaisuudessa keskeinen kysymys on, kuinka metsävaratiedossa tapahtuvia muutoksia (hakkuut, metsätuhot) päivitetään mahdollisimman ajantasaisesti.

LÄHTEET

- Holmgren J., Barth A., Larsson H., Olsson H. 2012. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters. *Silva Fennica* 46: 227–239.
- Holopainen M., Vastaranta M., Rasinmäki J., Kalliovirta J., Mäkinen A., Haapanen R., Melkas T., Yu X., Hyyppä J. 2010. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research* 129: 1131–1142.
- Holopainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., Yu, X., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Tanhuanpää, T. & Alho, P. 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – a case study in heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, in press.
- Holopainen, M. & Hyyppä, J. 2009. Kohden lasermittauksiin perustuvaa täsmämetsätaloutta. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009:357-360.
- Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M., & Hyyppä, H. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(3)2011:128-149.
- Kaartinen H., Hyyppä J., Yu X., Vastaranta M., Hyyppä H., Kukko A., Holopainen M., Heipke C., Hirschmugl M., Morsdorf F., Næsset E., Pitkänen J., Popescu S., Solberg S., Wolf BM., Wu JC. 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing* 4: 950–974.
- 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.
- Korhonen L., Peuhkurinen J., Malinen J., Maltamo M., Suvanto A., Packalén P., Kangas J. 2008. The use of airborne laser scanning to estimate sawlog volumes. *Forestry* 81: 499–510.
- Korpela I., Dahlin B., Schäfer H., Bruun E., Haapaniemi F., Honkasalo J., Ilvesniemi S., Kuutti V., Linkosalmi M., Mustonen J., Salo M., Suomi O., Virtanen H. 2007. Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. *Proceedings of ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, September 12–14, 2007, Espoo, Finland. IAPRS Vol. XXXVI, Part 3 / W52, pp. 227–233.*

- Korpela I., Ørka HO., Maltamo M., Tokola T., Hyyppä J. 2010. Tree species classification using airborne LiDAR – Effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type. *Silva Fennica* 44: 319–339.
- Laasasenaho J. 1982. Taper curve and volume function for pine, spruces and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108: 1–74.
- Liang X., Hyyppä J. 2013. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors* 13: 1614–1634.
- Liang X., Litkey P., Hyyppä J., Kaartinen H., Kukko A., Holopainen M. 2011. Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *Photogrammetric Journal of Finland* 22: 37–48.
- Liang X., Litkey P., Hyyppä J., Kaartinen H., Vastaranta M., Holopainen M. (2012) Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50: 661–670.
- Liang X., Kankare V., Yu X., Hyyppä J. & Holopainen M. 2013. Automated Stem Curve Measurement Using Terrestrial Laser Scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. In press.
- Maltamo M., Bollandsås OM., Vauhkonen J., Breidenbach J., Gobakken T., Næsset E. 2010. Comparing different methods for prediction of mean crown height in Norway spruce stands using airborne laser scanner data. *Forestry* 83: 257–268.
- Maltamo M., Mehtätalo L., Vauhkonen J., Packalén P. 2012. Predicting and calibrating tree attributes by means of airborne laser scanning and field measurements. *Canadian Journal of Forest Research* 42: 1896–1907.
- Maltamo M., Peuhkurinen J., Malinen J., Vauhkonen J., Packalén P., Tokola T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica* 43: 507–521.
- Moskal LM., Zheng G. 2011. Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing* 4: 1–20.
- Næsset E., 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.
- Ørka HO., Gobakken T., Næsset E., Ene L., Lien V. 2012. Simultaneously acquired airborne laser scanning and multispectral imagery for individual tree species identification. *Canadian Journal of Remote Sensing* 38: 125–138.
- Packalén P., Maltamo M. 2008. Estimation of species-specific diameter distributions using airborne laser scanning and aerial photographs. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1750–1760.
- Persson Å., Holmgren J., Söderman U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 925–932.

- Peuhkurinen J., Maltamo M., Malinen J. 2008. Estimating species-specific diameter distributions and saw log recoveries of boreal forests from airborne laser scanning data and aerial photographs: A distribution-based approach. *Silva Fennica* 42: 625–641.
- Peuhkurinen J., Maltamo M., Malinen J., Pitkänen J., Packalén P. 2007. Preharvest measurement of marked stands using airborne laser scanning. *Forest Science* 53: 653–661.
- Peuhkurinen J., Mehtätalo L., Maltamo M. 2011. Comparing individual tree detection and the area-based statistical approach for the retrieval of forest stand characteristics using airborne laser scanning in Scots pine stands. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 583–598.
- Vastaranta M., Kankare V., Holopainen M., Yu X., Hyyppä J., Hyyppä H., 2012. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67 73–79.
- Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkänen J., Solberg S., Wang Y., Weinacker H., Hauglin KM., Lien V., Packalén P., Gobakken T., Koch B., Næsset E., Tokola T., Maltamo M. 2012. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry* 85: 27–40.
- Vauhkonen J., Korpela I., Maltamo M., Tokola T. 2010. Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sensing of Environment* 114: 1263–1276.
- Vauhkonen J., Packalén P., Malinen J., Pitkänen J., Maltamo M. 2013a. Airborne laser scanning based decision support for wood procurement planning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI:10.1080/02827581.2013.813063
- Vauhkonen J., Hakala T., Suomalainen J., Kaasalainen S., Nevalainen O., Vastaranta M., Holopainen M., Hyyppä J. 2013b. Classification of spruce and pine trees using active hyperspectral LiDAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10: 1138–1141.
- Villikka M., Packalén P., Maltamo M. 2012. The suitability of leaf-off airborne laser scanning data in an area-based forest inventory of coniferous and deciduous trees. *Silva Fennica* 46: 99–110.
- Yu X., Hyyppä J., Vastaranta M., Holopainen M., Viitala R., 2011. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing* 66 (1), 28–37.