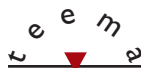


Ville Kankare, Mikko Niemi, Mikko Vastaranta, Markus Holopainen ja Juha Hyyppä

Puustobiomassan kartoituksen ja seurannan kehittäminen



Luonnonvarariskien hallinta

Johdanto

Metsävarojen inventoinnin keskeinen kiinnostuksen kohde on perinteisesti ollut runkopuuston tilavuus. Viime vuosina puustoon sitoutuneen biomassan määrä on kuitenkin noussut entistä tärkeämmäksi tunnukseksi. Biomassatietoa käytetään metsiin sitoutuneen hiilen määrän (hiilitaseen) laskennassa sekä bioenergiapotentiaalin kartoituksessa. Puustobiomassassa tapahtuvia muutoksia voidaan puolestaan hyödyntää metsätuhojen kartoituksessa ja seurannassa. Tietotarpeet kattavat kaikki mittakaavat yksittäisestä puusta laajojen alueiden kansallisiin ja kansainvälisiin biomassamuutosten seurantatehtäviin.

Puustobiomassan määrästä ja sen muutoksesta pystytään tuottamaan tarkka suuraluetason estimaatti koealaotantaan perustuvilla menetelmillä, kuten valtakunnan metsien inventoinnilla (VMI). Monessa käytännön sovelluksessa, esimerkiksi bioenergian korjuussa ja siihen liittyvässä optimoinnissa ja logistiikassa, kaivataan kuitenkin kartoitustietoa (esim. rasterikarttaa). Yksi vaihtoehto tällöin on satelliittikuvatulkintaan perustuva VMI:n monilähdeinventointi, joka perustuu maastossa mitattujen referenssikoealojen tietojen yleistämiseen rasterikartaksi (25 m × 25 m) Landsat TM -satelliittikuvien avulla. Useissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että satelliittikuvatulkinnalla saavutettava kuviotason puuston estimointitarkkuus ei ole operatiivisen metsä- tai leimikkosuunnittelun näkökulmasta riittävä.

Tässä artikkelissa tarkastellaan, kuinka puusto-

biomassan kartoitusta ja seuranta voitaisiin kehittää hyödyntämällä Maanmittauslaitoksen (MML) ilmaista laserkeilausaineistoa. Lisäksi esitetään maastolaserkeilauksen mahdollisuuksia biomassainventointien referenssitiedon tuottamisessa.

Puustobiomassan kartoitus ja seuranta 3D-kaukokartoituksella

Viimeisen vuosikymmenen aikana uudet kolmiulotteista mittaustietoa tuottavat laserkeilaustekniikat ovat kehittyneet nopeasti. Lento-, maasto- ja mobiililaserkeilaus mahdollistavat yksityiskohtaisen puuston tarkastelun monella eri tasolla. Lentolaserkeilausta (Airborne laser scanning, ALS) voidaan hyödyntää yksittäisen puun tasolta laajemmille alueille. Esimerkiksi Suomessa lentolaserkeilaustekniikka on tärkeä osa metsävaratiedon keruuta. Maasto- ja mobiililaserkeilaus (Terrestrial/Mobile laser scanning, TLS/MLS) puolestaan mahdollistavat erittäin yksityiskohtaisen, jopa oksatason, tiedon mittaamisen. Lasermittaukset ovat tämän vuoksi erinomainen lähtökohta biomassakartoituksessa: maasto- ja lentolasermittausten avulla saadaan tarkkaa tietoa puiden latvuksista sekä puiden tilajärjestyksestä, joita on työlästä mitata perinteisin maastomittausmenetelmin. Voidaankin siis olettaa, että laserkeilauksen avulla on mahdollista tarkentaa olemassa olevia biomassan estimointimenetelmiä kaikilla mittakaavatasoilla yksittäisen puun biomassan määrittämisestä laajojen alueiden sovelluksiin.

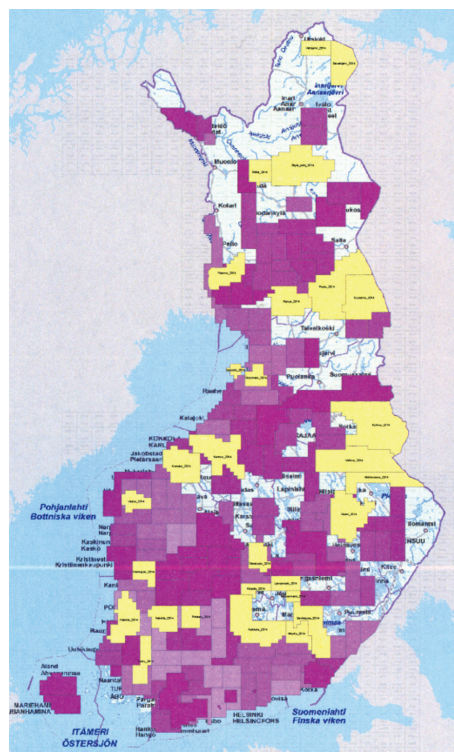
Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston hyödyntäminen puustobiomassan kartoituksessa

Lukuisissa metsäsuunnitteluinventointeihin liittyvissä tutkimuksissa on todistettu, että lentolaserkeilaukseen perustuvalla menetelmällä pystytään tuottamaan tarkkaa rasteri- ja kuviotason puustotietoa. Laserkeilausinventointi pitäisikin ottaa mahdollisuuksien mukaan lähtökohdaksi myös laajojen alueiden puustobiomassan kartoituksessa. Suomen olosuhteissa kustannustehokkuus voidaan varmistaa käyttämällä jo olemassa olevia laserkeilausaineistoja: Maanmittauslaitos (MML) tuottaa laserkeilaukseen perustuvaa maastomallia ja aineisto on ilmaiseksi kenen tahansa käytettävissä. Tällä hetkellä MML:n laserkeilausaineisto kattaa jo noin 65 % Suomesta, lähivuosina koko Suomen (kuva 1).

MML:n ALS-aineisto kuvataan keväällä lehdettömään aikaan, koska aineiston keskeisenä käyttökohteena on maanpintamallin tuottaminen. Suurin osa metsäkuvauksista tehdään lehdelliseen aikaan kesällä. Lehdettömään aikaan tehtyjen kuvausten käyttökelpoisuutta puustotunnusten estimoinnissa on kuitenkin tutkittu esimerkiksi Joensuun / Itä-Suomen yliopistossa Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion koordinoimassa Kevätlaser-hankkeessa. Tulokset olivat lupaavia: puustotunnusten tulkintatarkkuus ei poikennut merkittävästi kesäaikaan hankitun harvapulssisen laserkeilausaineiston tarkkuudesta; itse asiassa lehdettömään aikaan suoritettujen kuvaukset tuottivat jopa hieman tarkemman tuloksen kuin lehdellisen ajankohdan kuvaukset.

MML on tarjonnut ilmaisia paikkatietoaineistoja noin kaksi vuotta. Julkisen paikkatietoaineiston ilmaisen jakelun taustalla on ajatus lisäarvopalveluiden tuottamisesta paikkatiedon ja paikkatietoanalyysien avulla. MML:n laserkeilausaineisto on yksi esimerkki MML:n julkisista paikkatietoaineistoista. Puuston biomassan kartoitus ja biomassamuutosten seuranta on yksi mielenkiintoinen sovellusalue, jossa MML:n julkisilla paikkatietoaineistoilla voitaisiin saavuttaa sekä kustannussäästöjä että lisäarvoa.

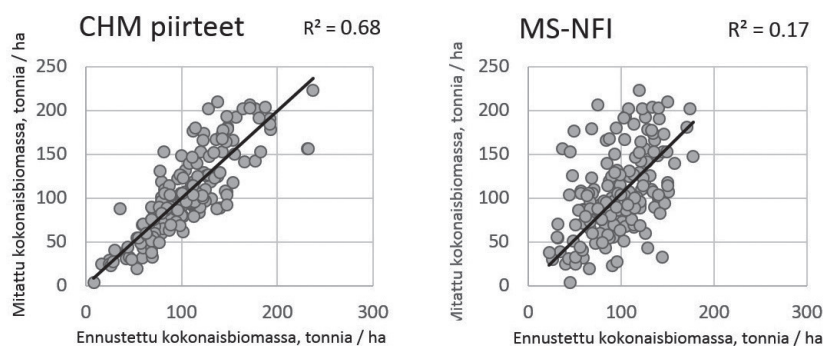
Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos sekä Geodeettinen laitos olivat vuosina 2013–2014 mukana Tekesin rahoittamassa ja FIBIC Oy:n / CLEAN OY:n koordinoimassa BEST-hankkeessa (Sustainable Bioenergy Solutions For Tomorrow). Metsämies-



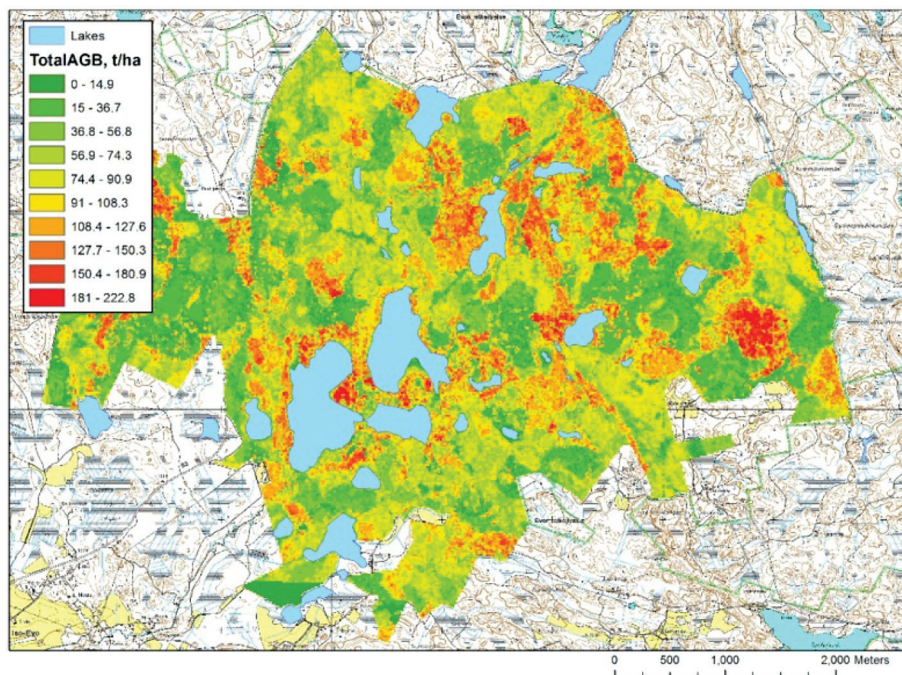
Kuva 1. MML:n laserkeilausaineiston kattavuus (2008–2014). Lilan sävyt kuvaavat ennen vuotta 2014 mitattua laserkeilausaineistoa ja keltainen väri vuoden 2014 mitaussuunnitelmaa.

ten säätiö on myös tukenut 3-vuotisella apurahalla väitöskirjahanketta liittyen laserkeilausaineiston hyödyntämiseen puuston biomassan kartoituksessa ja seurannassa. Helsingin yliopiston ja Geodeettisen laitoksen tutkijat selvittivät laserkeilausinventointien tarkkuutta puu-, koala- ja kuviotason puustobiomassan inventoinnissa sekä kehittivät MML:n valtakunnalliseen laserkeilausaineistoon perustuvaa kustannustehokasta bioenergiapotentiaalin kartoitusmenetelmää, jota voitaisiin hyödyntää esimerkiksi bioenergian korjuun suunnittelussa, optimoinnissa ja logistiikassa. Lisäksi selvitettiin yhteistyössä Metsähallituksen ja Arbonaut Oy:n kanssa MML:n laserkeilausaineiston tarkkuutta vajaatuottoisten turvemaiden puustoon sitoutuneen biomassan kartoituksessa.

Hankkeen aikana tehdyt tutkimukset osoittivat, että MML:n aineiston avulla on mahdollista kartoittaa ositetason (runko, latvus) metsäbiomassaa tarkasti.



Kuva 2. MML ALS-inventoinnilla estimoitu koealatason biomassaestimoinnin (vasemmalla) tarkkuus vs VMI-monilähdeinventoinnin (oikealla) tarkkuus samoilla koealoilla Evolla, Hämeenlinnassa.



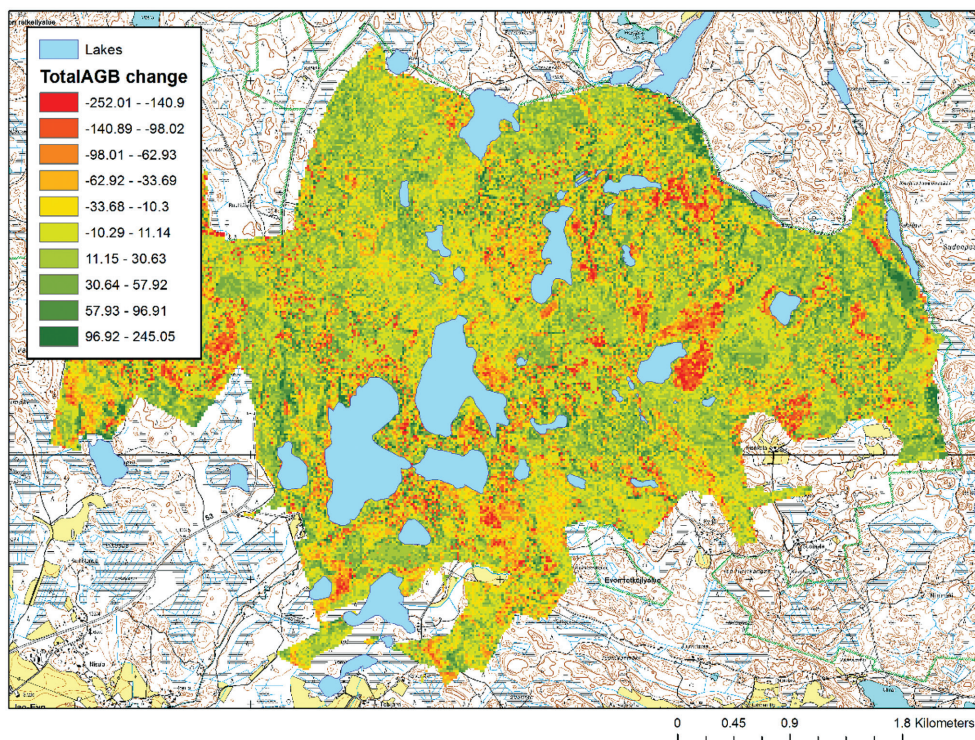
Kuva 3. Puustobiomassakartta (kokonaisbiomassa, TotalAGB) Evon alueelta, Hämeenlinnassa.

Tuloksia verrattiin VMI:n monilähdeinventoinnin ennusteisiin samoilla koealoilla. MML:n ALS-aineiston avulla tuotetut biomassaennusteet olivat selkeästi tarkempia (kuva 2).

Kuvassa 3 on havainnollistettu MML:n ALS-aineiston avulla tehdyt kokonaisbiomassaennusteet Hämeen ammattikorkeakoulun Evon opetuskasvuston alueella. Biomassakartta on esimerkki lopputuotteesta, joka voidaan tuottaa kustannustehokkaasti,

mikäli kartoitettavalta alueelta on olemassa MML:n ALS-aineiston lisäksi ajan tasalla olevaa, maastossa mitattua referenssikoealatieta.

Kuvassa 3 esiteltyä kokonaisbiomassan ennustemenetelmää voidaan myös hyödyntää biomassamuutosten kartoituksessa. Biomassamuutosten kautta on puolestaan mahdollista kerätä tärkeää tietoa kaiken aikaa lisääntyvistä metsätuhoista, kuten myrsky-, lumi-, kuivuus- ja hyönteistuhoista.



Kuva 4. Muutos kokonaisbiomassassa (Total AGB change) Evon alueella, Hämeenlinnassa, vuosien 2006 ja 2012 välisenä aikana.

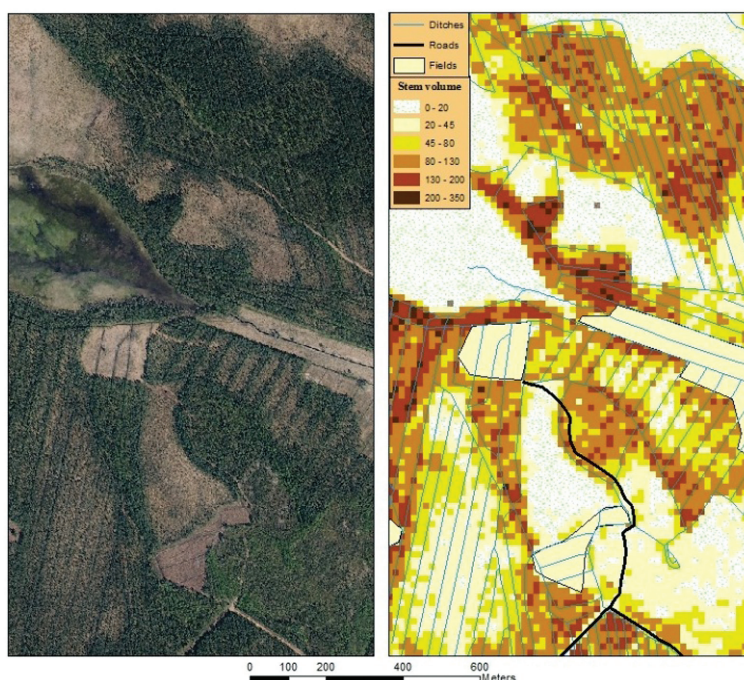
Kuvassa 4 havainnollistetaan kahden eri ajankohdan ALS perusteisen kokonaisbiomassaennusteiden välistä eroa. Mitä punaisempi väri, sitä suurempi biomassahävikki kohteella on ollut. Menetelmässä on käytetty 16 m × 16 m hilaruudukkoa, mutta samaa menetelmää on mahdollista hyödyntää jopa yksittäisen puun tasolla kartoitettaessa esimerkiksi puuston kasvua, tuulenskaatoja tai lumituhoja.

MML:n ALS-aineiston hyödyntämistä puuston biomassan laskennassa huomattiin vaikeuttavan vaihtuva laserkeilauskalusto sekä -parametrit, jotka aiheuttavat virhettä ennusteisiin. Ensimmäiset tähän aihepiiriin liittyvät tutkimukset osoittivat, että eri laserkeilauslaitteistoista johtuvaa harhaa on mahdollista minimoida hyödyntämällä biomassan laskennassa ALS-aineistosta muodostettua latvuspintamallia.

Uudessa metsäläissa poistettiin metsän uudistamisvelvoite vajaatuottoisilta ojitetuilta turvemailta, joilla puuston vuotuinen kasvu on kiertoaajan aikana keskimäärin alle 1 m³/ha. Lakimuutos koskee

576 000 ha suopinta-alaa ja se mahdollistaa aiempaa paremmat taloudelliset lähtökohdat kyseisten kohteiden puunkorjuulle, koska hakkuun jälkeen metsätaloudellisesti kannattamattomat kohteet voidaan jättää palautumaan kohti luonnontilaa.

Metsätalouden operatiivisen suunnittelun kannalta on oleellista tietää, saadaanko aluepohjaisella laserkeilausinventoinnilla riittävän luotettavaa tietoa kitumaasoiden puuston määrästä ja laadusta, jotta sitä voitaisiin käyttää kyseisten kohteiden rajaamiseen ja energiapuun korjuun kannattavuuden tarkasteluun. ”Best”-projektista saatujen tutkimustulosten mukaan MML:n ALS-aineisto soveltuu hyvin kitumaasoiden puuston kartoitukseen (kuva 5). Tulosten luotettavuutta arvioitiin RMSE:n (keskineliövirheen neliöjuuri) avulla, jolloin puuston tilavuudelle saatiin RMSE:ksi 10,5 m³/ha, pohjapinta-alalle 1.6 m²/ha ja keskipituudelle 1,3 m. Menetelmä oli lähes harhaton



Kuva 5. Puuston biomassakartta, Haapajärven tutkimusalue.

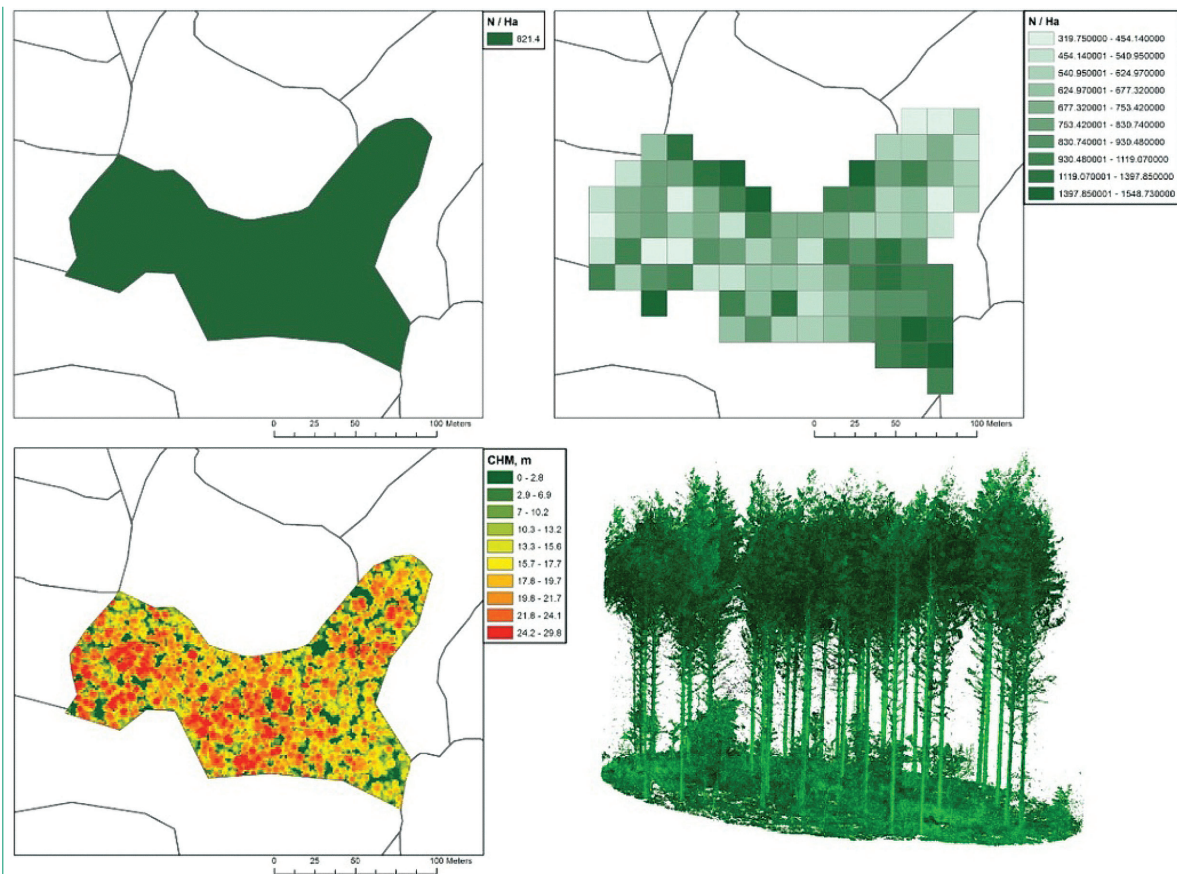
Kohti entistä tarkempaa biomassainventointia – maastolaserkeilauksen hyödyntäminen

Metsäsuunnittelun otosyksikkönä ja lähtökohtana on perinteisesti ollut toimenpidekuvio, jonka keskikoko on Etelä-Suomessa n. 2 ha, Pohjois-Suomessa huomattavasti suurempi. Kuvioittaisessa arvioinnissa menetetään kuitenkin runsaasti biomassatietoa, jos metsikön rakenne vaihtelee kuvion sisällä. Kuvassa 6 on havainnollistettu tätä tiedon häviämistä, tässä tapauksessa runkoluvun vaihtelua yhden toimenpide kuvion sisällä.

Edellä esitetty aluepohjainen laserkeilausinventointi, joka on operatiivisessa käytössä esim. Suomen Metsäkeskuksessa, tuottaa melko tarkkaa rasteritason tietoa (kuvan 6 oikea yläkulma). Laserkeilaukseen perustuvalla yksinpuintulkinnalla voidaan päästä puutason tai puuryhmätason tietoon (kuvan 6 vasen alanurkka). Maastolaserkeilauksella pystytään tarkentamaan tätä puutason biomassatietoa, koska puun rungosta ja latvuksesta voidaan tehdä tarkkoja automaattisia mittauksia (kuvan 6 oikea alanurkka).

Maastolaserkeilauksen mahdollisuudet ovatkin nimenomaan maastoreferenssitiedon tuottamisessa: tarkka ja harhaton metsäbiomassakartoitus laajoilla alueilla vaatii yksityiskohtaista puustotietoa yksittäisen puun tasolta. Puun biomassan määrittäminen tarkasti voidaan tällä hetkellä tehdä ainoastaan kaatamalla ja punnitsemalla puun osat. Tämä lähestymistapa on kuitenkin erittäin kallis ja aikaa vievä, eikä sitä ole mahdollista toteuttaa laajoille alueille. Tämän vuoksi yksittäisen puun biomassan ennustaminen on perustunut biomassamalleihin, joissa biomassa ennustetaan helposti mitattavien puustotunnusten, kuten läpimitan ja pituden kautta. Nämä mallit eivät kuitenkaan yleensä hyödynnä mittaustietoa puuston latvuksesta, jonka ennustamisessa onkin erityisesti ollut epätarkkuutta.

Maastolaserkeilauksen (TLS:n) hyödyntäminen referenssiaineiston mittaamisessa avaa mielenkiintoisia mahdollisuuksia lentolaserkeilaus (ALS)-tulkintojen tarkentamiseen niin yksittäisten ajankohtien kartoituksessa kuin muutostulkinnossa. Ensimmäisten tutkimustulosten mukaan TLS-mittauksilla saadaan tarkkoja tuloksia niin puun



Kuva 6. Puuston runkoluvun vaihtelu toimenpidekuviolla ja erilaisten inventointimenetelmien tuottama tieto. Vasen ylänurkka: kuvion keskiarvotunnus, runkoluku (N/ha); Oikea ylänurkka: 16 m×16 m pikseliruudukolle ennustettu puustotieto, runkoluku (N/ha); Vasen alanurkka: Tiheäpulsin lentolaserkeilauksen latvusmalli, josta on mahdollista erottaa yksittäiset puut; Oikea alanurkka: Maastolaserkeilauksella mitattu ”virtuaalimetsä”.

kokonaisbiomassan kuin biomassaositteiden (runko, oksat, neulaset) osalta, mikäli näkyvyys mitattavalla koealalla on riittävä. TLS:n käyttö tarkentaa ennen kaikkea latvusbiomassaositteiden ennustamista, joiden estimointi on vaikeaa ja työlästä perinteisten maastomittausten avulla.

Päätelmät

Maanmittauslaitoksen ilmainen, harvapulsinen lentolaserkeilausaineisto mahdollistaa kustannustehokkaan ja melko tarkan vaihtoehdon laajojen alueiden puustobiomassakartoitukseen ja seurantaan.

Menetelmän tarkkuuden on todettu olevan selkeästi parempi verrattuna käytössä olevaan VMI-monilähdeinventointiin, mutta käytännön metsäinventoinnin kannalta haasteita ovat lehdettömään aikaan tehdyt keilaukset sekä usean eri laitteiston käytöstä aiheutuvat ongelmat.

Biomassakartoitusten näkökulmasta MML:n ALS-aineiston merkittävänä ongelmana on myös se, että aineisto on jo osin vanhentunutta (ensimmäiset kuvaukset vuodelta 2008). Riippumatta metsävaratiedon hyödyntämiskohteesta, keskeinen vaatimus on biomassatiedon ajantasaisuus. Metsätieteen Aikakauskirjan numerossa 4/2014 esitettiin visioita seuraavan sukupolven metsävaratiedon tuot-

tamiseen. Mikäli visiot toteutuvat, puuston tarkka biomassatieto on osa tulevaisuuden metsävaratietoa. Tällöin MML:n nykyiseen korkeusmallihankkeeseen tuottaman ALS-aineiston hyödyntäminen ei ole enää ajankohtaista.

Tulevaisuudessa MML:n ALS-aineistolla voidaan nähdä kuitenkin toinen, merkittävä sovelluskohde: Puustobiomassassa tapahtuvat muutostulkintamenetelmät voivat perustua useamman ajankohdan ALS-aineistoihin tai ALS-pintamallin yhdistämiseen toisena ajankohtana otettuun ilmakehän tai satelliittikuvapintamalliin. Kaikissa tapauksissa lähtötiedoksi tarvitaan mahdollisimman tarkasti tuotettua maanpinnan korkeusmallia. Metsätuhojen ja tuhoriskien kartoituksen, seurannan ja hallinnan osa-alueilla voidaankin nähdä runsaasti MML:n ALS-aineistojen hyödyntämismahdollisuuksia.

Maastolaserkeilaus on potentiaalinen menetelmä tarkan tiedon mittaamiseen yksittäisistä puista tai pienalueista. Menetelmää voidaan hyödyntää referenssitiedon mittaamiseen, jota tarvitaan puu- tai rasteritason kaukokartoitustulkinnassa. TLS:n tärkeä sovellus tulee lisäksi olemaan uusien biomassamallien luominen pystyvuusta mitattujen tunnusten avulla. Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä valtaosa puun biomassasta on rungossa, mutta latvuston merkitys kasvaa erityisesti kaupunkimetsissä ja tropiikissa. Jo tähän mennessä tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet TLS:n tarkentavan erityisesti juuri latvusbiomassan ennustetarkkuutta.

Tarvitaan kuitenkin vielä tutkimusta, kuinka TLS toimii erilaisissa (tiheys, puuston koko, puulaji, jaksoisuus) metsiköissä. Erityisen mielenkiintoisia tutkimusaiheita ovat myös mobiilit laserkeilausmittaukset (reppukeilain, mönkijä, hakkuukone, lennokki) sekä maastolaserkeilauksen yhdistäminen lentolaserkeilaukseen.

Kirjallisuutta

- Kankare, V., Rätty, M., Yu, X., Holopainen, M., Vastaranta, M., Kantola, T., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013. Single tree biomass modelling using airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 85: 66–73.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. & Alho, P. 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75: 64–75.
- Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., Viitala, R. 2013. Retrieval of forest aboveground biomass and volume with airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 5: 2257–2274.
- Kankare, V., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J., Hyypä, H. & Alho, P. 2014. The accuracy of aboveground biomass mapping in Finland with sparse density, leaf-off airborne laser scanning data. Manuscript.
- 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(1): 99–110.
- Ville Kankare, Mikko Niemi, Mikko Vastaranta & Markus Holopainen, Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos
Juha Hyypä, MML:n paikkatietokeskus
Sähköposti ville.kankare@helsinki.fi