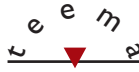


Juha Hyyppä, Markus Holopainen, Mikko Vastaranta ja Eetu Puttonen

Yksittäisten puiden mittaaminen ja muutosten seuranta laserkeilauksella



Johdanto

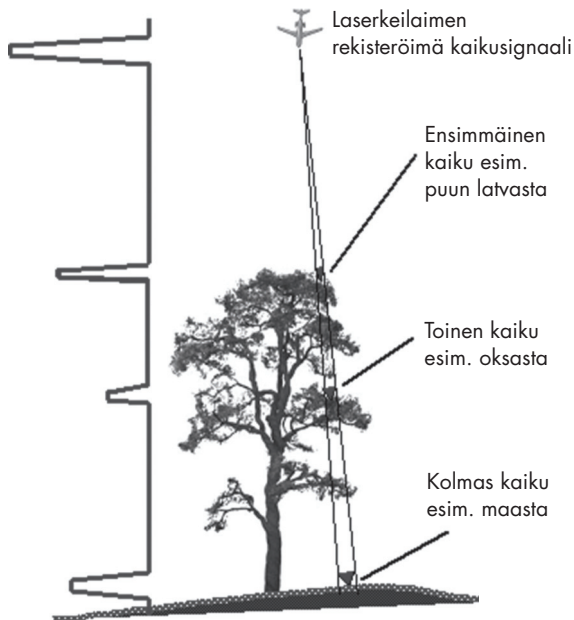
Puuston tilavuus ja kasvu ovat metsien inventoinnin perustietoja. Näiden keskimääräistä kehitystä on seurattu esimerkiksi valtakunnan metsien inventoinneissa 1920-luvulta lähtien. Etenkin operatiivisessa metsäsuunnittelussa ollaan kuitenkin yhä kiinnostuneempia yksityiskohtaisesta, jopa yksittäisiä puita koskevasta tiedosta. Metsäsuunnittelulaskenta perustuu puulajikohtaisiin runkolukusarjoihin, jotka joudutaan tällä hetkellä johtamaan inventoinnin tuottamista metsikön keskitunnuksista. Laserkeilauksen (Airborne Laser Scanning, ALS) perustuva mittaus tarjoaa mahdollisuuden muodostaa runkolukusarja ainakin suurimmalta osalta suoraan laserkeilausaineiston avulla.

Tarve tehostaa metsien mittaamista ja vähentää työvoimaa synnytti 1970-luvulta alkaen metsien inventoinnin kaukokartoitustutkimuksen. Lasermittauksia, jotka tuottivat metsästä poikkileikkauksia, on käytetty kaukokartoitukseen perustuvassa metsänarvioinnissa aina 1980-luvulta lähtien esimerkiksi puun pituuden, rungon paksuuden ja biomassan arvioinnissa. Laserkeilauksen avulla saatiin metsistä muodostettua erilaisia kattavia kolmiulotteisia malleja, joiden avulla on tutkittu mm. maaston korkeusmallin määrittämistä, puuston keskipituuden ja tilavuuden arviointia, yksittäisen puun pituuden ja tilavuuden arviointia, puulajien luokittelua, metsän kasvun mittaamista ja harvennettujen puiden havaitsemista. Yhteenvetoja laserkeilauksen metsäsovel-

luksista ovat esittäneet mm. Næsset ym. (2004) ja Hyyppä ym. (2009). Tässä kirjoituksessa esitetään lyhyt yhteenveto laserkeilaukseen perustuvasta yksinpuintulkinnasta ja sen käyttökohteista.

Laserpulssin ja puuston vuorovaikutus

Laserpulssin osuma puustoon tuottaa yhden tai useamman paluukaiun. Yksittäisen paluukaiun tapauksessa laserpulssi osuu esimerkiksi tiheään lehvästön pintaan ja aiheuttaa yhden paluukaiun. Koska käytännössä metsän latvus ei ole yhtenäinen pinta, ja koska puustossa on erisuuruisia aukkoja, tilanne on monimutkaisempi: laserpulssi osuu lehvästöön, läpäisee latvuksen ylimmän osan ja läpäisee osittain puuston eri osia, kuten puun runkoa, oksia ja lehtiä osuen lopulta maahan. Tapahtumasarja aiheuttaa useita paluukaikuja. Yleensä saadaan kuitenkin vain yksi kaiku. On perusteltua olettaa, että ensimmäiset kaitut tulevat latvuston huipulta ja viimeiset suureksi osaksi maanpinnasta, mikä mahdollistaa maanpinnan tason arvioimisen. Usean paluukaiun avulla saadaan siis hyödyllistä tietoa metsän rakenteesta. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1. Laserpulssin ja puuston vuorovaikutus. Laserkeilaimen rekisteröimä kaikusignaali kuvaa vastaanotetun kaiun voimakkuutta ajan funktiona.

Puuston pituusmallin laskeminen

Puuston pituusmalli saadaan laskettua ylimmistä paluukaiuista muodostetun pinta- eli latvamallin ja maan korkeusmallin erotuksesta. Puuston pituusmalli tuotetaan joko pistepilvenä tai ruutumallina. Maan korkeusmallin laskemiseen on kehitetty useita menetelmiä, jotka yleensä perustuvat ensin maapinnan tason alapuolelta tulevien satunnaisten kaikuja poistamiseen, sen jälkeen alimmalta tasolta tulevien kaikuja luokitteluun isolla pikselikoolla (esim. 80 m) ja lopulta maanpintapisteistön tihentämiseen käyttäen apuna mm. sääntöpohjaista luokittelua. Esimerkkejä kaupallisista ohjelmistoista, joissa on maan korkeusmallin laskenta-algoritmi, ovat suomalainen TerraScan ja SCOP++.

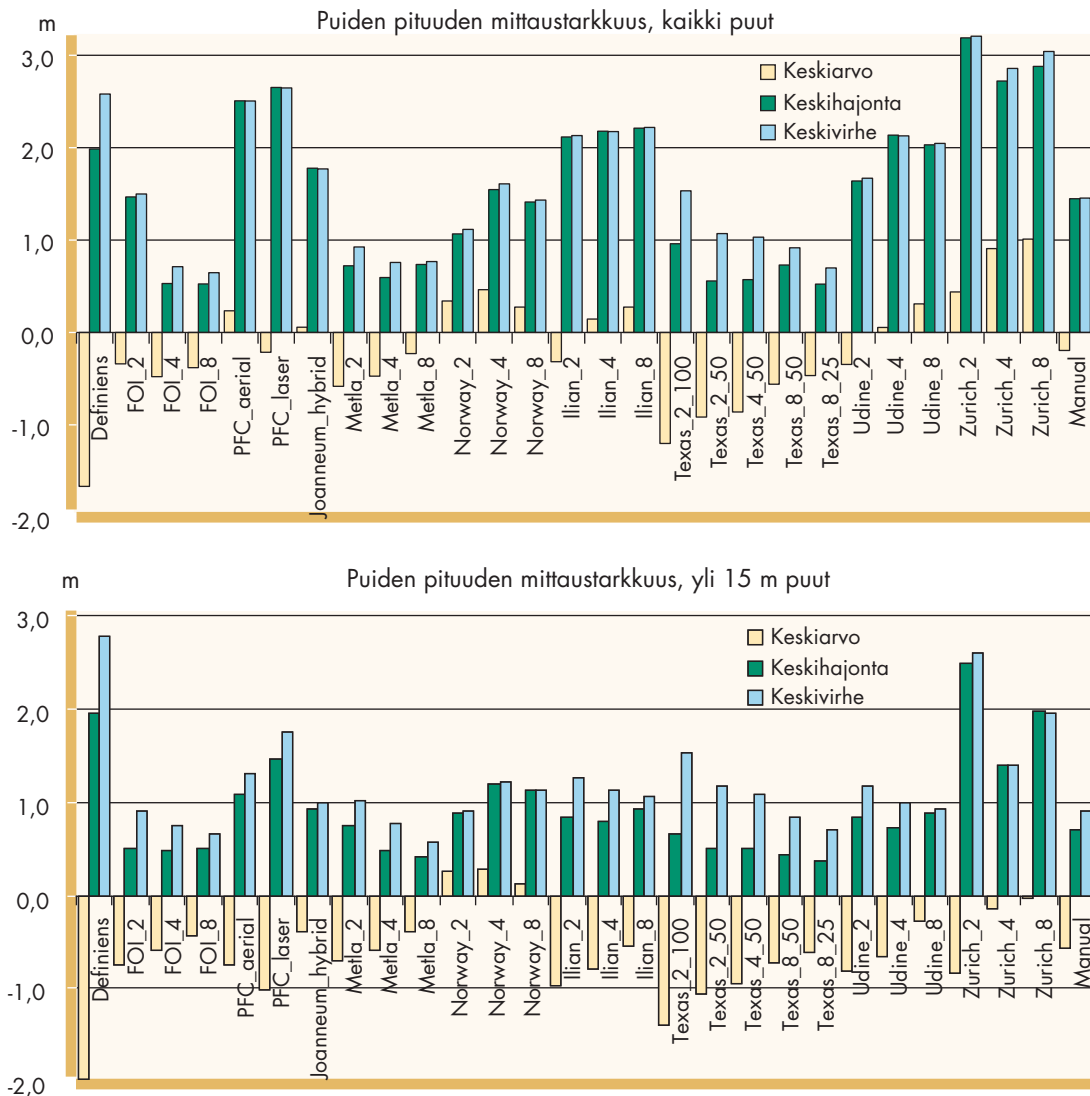
Puun pituus pystytään määrittämään laserkeilauksella tarkemmin kuin perinteisillä metsänmittausmenetelmillä. Pituus kuitenkin yleensä aliarvioituu, koska laserkeilaus tunkeutuu puun latvukseen eikä sen latvasta välttämättä havaita kaikuja. Latvuksen korkeimman kohdan aliarvio lisääntyy pulssitiheyden harventuessa. Toisaalta aliarviota puuston pituu-

teen aiheuttaa myös se, että maastomalli yliarvioi maanpinnan tasoa aluskasvillisuuden vuoksi. Pituisuuden aliarvio, eli harha, joka on tyypillisesti 0,5–1 m, voidaan kuitenkin lähes kokonaan poistaa tarkkojen maastomittausten avulla.

Yksittäisen puun tulkinta laserkeilauksella

Yksittäisen puun tulkintamenetelmässä etsitään ensin puun sijainti, jonka jälkeen määritetään latvuksen koko sekä puulaji latvusinformaation ja mahdollisesti laseraineiston kanssa rekisteröidyn ilmakuva-aineiston avulla. Tämän jälkeen kiinnostuksen kohteena ovat puutunnukset, kuten rinnankorkeusläpimita, tilavuus ja biomassa, voidaan määrittää mallintamalla. Laserkeilaukseen perustuvassa yksinpuintulkinnassa on useissa tutkimuksissa hyödynnetty puiden latvuksen koon, pituuden ja rinnankorkeusläpimitan välisiä malleja. Kyseiset mallit ovat kuitenkin herkkiä lähtötietojen virheille: etenkin latvuksen kokoa on vaikea mitata tarkasti automaattisella tulkinnalla ja laserkeilaus useimmiten aliarvioi latvuksen koon, joten rinnankorkeusläpimitan arviointi puiden pituuden ja latvuksen läpimitan avulla sisältää suurta epävarmuutta.

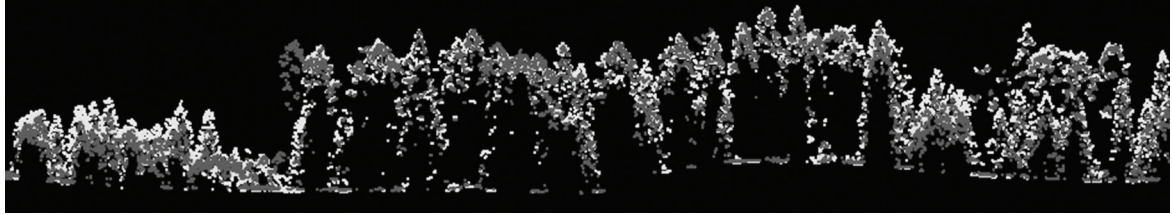
Yksittäisten puiden laserkeilaukseen perustuvaan tulkintaan on kehitetty lukuisia menetelmiä. Geodeettinen laitos koordinoi vuosina 2005–2008 kansainvälistä tutkimusta, jossa verrattiin eri menetelmien toimivuutta puiden sijainnin, pituuden ja muiden tunnusten määrittämisessä. Kuvassa 2 on esitetty eri menetelmien tarkkuus puiden pituuden mittaauksessa, kun laseraineiston pulssitiheys oli 2–8 pulssia/m². Menetelmiä testattiin sekä kaikkiin että vain yli 15-metrisiin puihin. Tulokset osoittavat, että puiden pituuden aliarvio on yleensä noin 0,5 m ja että pituusmittauksen tarkkuus on parhaimmillaan 0,5–1 m. Menetelmien väliset keskinäiset vaihtelut ovat paljon suuremmat kuin pulssitiheydestä syntyvät erot. Parhaat tulokset saavutettiin menetelmillä, jotka oli kehitetty pohjoisella havumetsävyöhykkeellä. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että myös yksittäisen puun menetelmät tarvitsevat suuraluetason opetusaineistoa puiden lukumäärän, latvusleveyden ja läpimitan kalibrointiin. Merkittävä tulos oli myös se, että pulssitiheydellä 2 pulssia/m² saavutettiin hyviä tuloksia sekä puiden löytymiselle että puun pi-



Kuva 2. Eri menetelmillä ja eri pistetiheyksillä analysoitu puuston pituuden mittaustarkkuus mukaan lukien se, löysikö algoritmi puun. Kuvassa esitetään lasermittauksen mittaustarkkuuden keskiarvo, keskihajonta ja keskiVirhe. Referenssinä nollatasona on maastossa mitattu pituuden keskiarvo. Lyhenteet x-akselilla ovat erilaisia yksinpuuntulkinnan menetelmiä eri toimijoiden toteuttamana mainituilla pulssitiheyksillä, 2, 4 tai 8 pulssia/m².

tuudelle. Parhaimmillaan menetelmät löysivät 90% referenssiaineiston puista. Tutkimustulokset myös osoittivat, että yksittäisten puiden tilavuus voidaan arvioida noin 30–35% keskiVirheellä. Koala- ja kuviotasolla voidaan päästä alle 10% keskiVirheeseen.

Laserkeilaukseen perustuvien yksittäisten puiden tulkintamenetelmien vahvuutena verrattuna ilmakuvamenetelmiin on puiden pituustiedon yksinkertainen ja automaattinen tuottaminen. Pituustieto voidaan saada myös ilmakuvista digitaalisen fotogrammetrian menetelmillä, mutta epätarkemmin.



Kuva 3. Laserkeilauksella tuotetusta pistepilvestä rajattu profiili 150 m pituiselta ja 6 m leveältä alueelta. Valkoiset pisteet kuvaavat laserkeilausta vuodelta 2003 ja tumman harmaat pisteet laserkeilausta vuodelta 1998. Kaadetut puut näkyvät vuoden 1998 aineistossa, mutta eivät vuoden 2003 aineistossa. Nuorten puiden kasvu on hyvin esillä profiilin vasemmassa osassa latvuksesta tulevien kaikujen korkeuserona. Lähde: Hyyppä ym. 2009.

Puulajitulkinta

Puulajitietoa tarvitaan metsikön metsänhoidollisten toimenpiteiden, kehityksen ja puutavaralajikertymän määrittämisessä.

Puulajitulkinta voi perustua laserkeilausaineiston avulla laskettuun latvuksen kokoon ja muotoon tai pistepilvestä irrotettuihin piirteisiin. Tulkinnaissa voidaan käyttää apuna ilmakuvilta laskettuja sävy- ja tekstuuripiirteitä. Koska laserkeilaus tuottaa puun latvan geometrian, voidaan ilmakuvan ja laserkeilauksen yhdistelmämalleissa erottaa myös latvuksen valaistu ja varjossa oleva osa ja käyttää sitä apuna tulkinnaissa: esimerkiksi kapealatvaisilla kuusilla on usein erilainen vaste kuin leveälatvuksisilla mänyillä. Viime aikoina uutena tutkimuskohteena on ollut laserintensiteettitiedon hyödyntäminen, jolla voidaan korvata ilmakuvat puulajitulkinnaissa.

Laserkeilaukseen perustuvaa puulajitulkintaa on viime aikoina tutkittu paljon. Havumetsäalueella puulajitulkinnaissa on parhaimmillaan päästy kolmella puulajilla (mänty, kuusi, lehtipuu) 90–95 % tarkkuuteen. Tällöin aineistona on ollut erittäin korkeapulssinen (yli 10 pulssia/m²) laserkeilausaineisto. Käytännön pulssitiheyksillä monijaksoisissa metsissä saavutetut tulokset ovat parhaimmillaan kuitenkin luokkaa 75–85 %. Puulajitulkintamenetelmien kehittäminen onkin yksi tärkeimmistä jatkotutkimuskohteista laserpohjaisessa metsien mittaamisessa.

Metsän muutos

Laserkeilausaineistossa näkyvät metsän muutokset pitävät sisällään puun latvuksen pituus- ja leveysmuutokset, neulasten ja lehtimassan vuodenaikavaihtelun, aluskasvillisuuden tilan sekä tuulen aiheuttamat latvuston muutokset.

Metsävaratiedon päivityksen kannalta kiinnostavia metsän muutoksia ovat hakkuut, kasvu ja tuhot. Hakkuiden osalta kiinnostuksen kohteena on harvennusleimikoille jäljelle jäävän puuston määrä, jota ei ainakaan toistaiseksi saada suoraan hakkuukonemittauksen yhteydessä. Useamman ajankohdan laserkeilauksella voidaan nähdä mahdollisuuksia yksittäisten puiden ja metsiköiden kasvun mittaamisessa sekä kasvupaikan puuntuotoskyvyn määrittämisessä. Toistaiseksi näistä aiheista on melko vähän tutkimustuloksia johtuen usempiaikaisten laserkeilausaineistojen puutteesta.

Metsän kasvun mittaaminen laserkeilauksella on periaatteessa suhteellisen yksinkertaista (kuva 3).

Pituuskasvu voidaan määrittää useilla menetelmillä: yksittäisen puun pituuseroina mittaussarjojen välillä, kahden eriaikaisen pintamallin erotuksena, käyttämällä pituushistogrammien eroja tai yksinpuintulkittujen puiden tilavuuseroja. Yu ym. (2004) tekivät laseraineistopohjaisen sovelluksen metsän kasvun mittaamiseen koela- ja metsikkötasoilla käyttämällä puittaista sovitusmenetelmää kahden eri ajankohdan lasermittausten välille. Menetelmän avulla 86:sta harvennetusta puusta tunnistettiin 63 automaattisesti oikein. Vallitsevasta latvuserroksesta harvennetut puut tunnistettiin kaikki oikein, mutta pieniä puita jäi tunnistamatta automaattisin menetelmin. Yksittäisen puun pituuskasvu voitiin määrittää noin 40 cm tarkkuudella.

Lopuksi

Aiemmissä tutkimuksissa on yleensä eroteltu jyrkästi yksinpuintulkintamenetelmät ja aluepohjaiset laserkeilausmenetelmät. Yksinpuintulkintamenetelmän suurimmat edut ovat runkolukusarjan tarkempi tulkinta sekä vähäisempi maastomittausten tarve (kts esim. Hyypä ym. 2009). Aluepohjaisen inventoinnin etuna puolestaan on se, että siinä voidaan hyödyntää halvempaa, matalapulssista laserkeilausaineistoa. Lisäksi aluepohjainen inventointi on helpompi yhdistää operatiiviseen metsäsunnittelulaskentaan, koska yksinpuintulkintaan tarkoitettujen operatiivisten ohjelmistot puuttuvat. Tulevaisuudessa korkeapulssista laserkeilausaineistoa on saatavissa entistä halvemmalla. Toisaalta on saatu ensimmäisiä tuloksia, joiden mukaan yksinpuintulkintaan perustuva laserkeilausinventointi toimii kohtuullisella tarkkuudella myös harvapulssisella aineistolla.

Jatkossa kysymys kuuluukin, missä inventointitehtävissä yksinpuintulkinnasta on hyötyä aluepohjaiseen menetelmään verrattuna. Kysymys kulminoituu metsäsunnittelulaskennassa käytettävien runkolukusarjojen tuottamiseen: yksinpuintulkinnalla päästään tarkempaan tulokseen tehtävissä, joissa tarvitaan tarkkaa, mitattuihin puihin perustuvaa runkolukusarjaa. Tällainen inventointitehtävä on esimerkiksi puutavaralajien arviointi. Sen sijaan keskitunnusten arvioinnissa aluepohjainen menetelmä voi tuottaa lähes yhtä tarkan tuloksen kuin yksinpuintulkinta. Lisäksi yksinpuintulkinnalla voidaan tuottaa tehokkaasti laajoilta alueilta puukarttoja, jotka voisivat olla yhdistettävissä esimerkiksi maastolaser- ja hakkuukonemittauksiin. Näin olisi mahdollista kerätä runkopankki, jota voitaisiin hyödyntää laajojen metsäalueiden yksinpuintulkinnassa tai esimerkiksi puiden laatutunnusten määrittämisessä. Koska laskennallisesti menetelmät poikkeavat täysin toisistaan, yksinpuintulkinnalla voidaan myös arvioida aluepohjaisen tulkinnan onnistumista ja myös päinvastoin.

Kirjallisuutta

- Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A. & Holopainen, M. 2009. Forest inventory using small-footprint airborne lidar. Teoksessa: Shan, J. & Toth C. (toim.). *Topographic Laser Ranging and Scanning: principles and processing*. CRC Press, Taylor & Francis, London, s. 335–370.
- Næsset, E., 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(6): 482–499.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Haapanen R., Yu, X., Melkas, T., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2009. Comparison between an area-based and individual tree detection method for low-pulse density als-based forest inventory. Teoksessa: Bretar, F., Pierrot-Deseilligny, M., Vosselman, G. (toim.). *Laser scanning 2009, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8 – Paris, France, September 1–2, 2009*. s.147–151.
- Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H. & Maltamo, M. 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 451–462.

■ Prof. Juha Hyypä ja FM Eetu Puttonen, Geodeettinen laitos; dos. Markus Holopainen, MMM Mikko Vastaranta, Helsingin yliopisto, Metsävarojen käytön laitos. Sähköposti juha.hyypa@fgi.fi