

Matti Maltamo, Petteri Packalén, Janne Uuttera, Esa Ärölä ja Juho Heikkilä

Laserkeilaustulkinnan hyödyntäminen metsäsuunnittelun tietolähteenä

Johdanto

Laserkeilausten hyödyntäminen metsätaloudellisissa sovelluksissa on herättänyt viime vuosina suurta mielenkiintoa Suomessa. Laserkeilausperiaatteita ja laserinstrumentteja on useita erilaisia, pääjakona niin sanottu ilmasta tehtävä laserkeilaus ja maalaserit. Maalaserilla tehtävää keilausta on testattu viime vuosina mm. hakkuukoneissa toimenpiteen jälkeen jäävän puuston mittaamiseksi. Ilmasta tehtävän laserkeilauksen osalta erityisesti kiinnostuksen kohteena on ollut metsävaratiedon tuottaminen metsäsuunnittelun tietolähteeksi eli nykymuotoisen kuvioittaisen arvioinnin korvaaminen. Tässä artikkelissa keskitytään ilmasta tehtävän laserkeilauksen (Airborne Laser Scanning, ALS) hyödyntämismahdollisuuksiin puustotunnusten estimoinnissa. Aihepiiriä on tutkittu runsaasti ja ensimmäiset käytännön metsätalouden inventoinnit on jo tehty.

Ilmasta tehtävässä laserkeilauksessa lentävässä aluksessa oleva laitteisto lähettää laserpulssin ja tulkitsee vastaanotetun signaalin. Koska valon nopeus on tunnettu, voidaan määrittää tarkka etäisyys kohteesta, jolta pulssi on heijastunut. Yksittäisten laserpulssien koordinaatit voidaan muuntaa korkeushavainnoiksi maanpäällisissä koordinaattijärjestelmissä, sillä keilaimen paikka tunnetaan tarkasti koko ajan. Laseraineistosta voidaan siten määrittää sekä maanpinnan korkeutta kuvaava maastomalli että kasvillisuuden korkeus erittäin tarkasti. Laserkeilausten avulla pystytään tuottamaan kolmiulotteis-

ta tietoa mitattavasta kohteesta, jolloin esimerkiksi puuston järeydessä tapahtuvat muutokset metsikkökuvioiden välillä pystytään tulkitsemaan tarkasti.

Mitattua laserpisteaineistoa kuvataan yleensä pulssitiheydellä, joka ilmoitetaan laserpulssien lukumääränä neliometriä kohti maanpinnalla. Tiheäpulsseissa laserkeilauksessa pulssitiheydet ovat vaihdelleet 5–30 pulssia/m². Vastaavasti harvapulssinen laserkeilaus tuottaa 0,5–2 pulssia/m². Lähtökohtaisesti on olemassa kaksi erillistä tekniikkaa puustotietojen tuottamiseen: yksinpuintulkinta ja aluepohjainen tulkinta. Yksinpuintulkinnassa tiheäpulsseista laserkeilainaineistosta tunnistetuista puista saadaan suoraan arvio puun pituudesta. Muut puutunnukset ennustetaan puun pituustiedon avulla puutason malleilla. Aluepohjaisessa tulkinnassa puolestaan ennustetaan suoraan koealatasen puustotunnuksia harvapulssisen laserkeilausaineiston avulla.

Puustotunnusten tulkinnan lisäksi laserkeilausinformaatiota voidaan hyödyntää monilla muilla tavoilla metsätaloudessa. Tarkkaa maastomallia voidaan käyttää esimerkiksi metsäautoteiden suunnittelussa. Vastaavasti kolmiulotteista laserpisteaineistoa voidaan hyödyntää monenlaisen ekologisen informaation tuottamisessa, esimerkiksi järeiden haapojen ja erilaisten metsikkörakenteiden tunnistamisessa sekä lahoppuuintenttien ohjaamisessa. Suurin ongelma laserkeilausaineiston hyödyntämisessä on puulajitulkinta, sillä laserpisteaineisto ei suoraan sisällä ilma- ja satelliittikuvista tuttua sävyarvioinformaatiota.

Puustotunnusten tulkinta laserkeilaus-aineistosta

Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa on viime vuosina kehitetty erityisesti laseraineiston aluepohjaista tulkintaa. TEKESin rahoittamassa tutkimushankkeessa ”Laserkeilauksen käyttö metsävarojen tarkassa inventoinnissa 2005–2007” (Metsälaser) keskeinen tavoite oli kehittää menetelmä puulajeittaisten puustotunnusten ennustamiseksi laserkeilausinformaation avulla kuviotasolla. Tämä toteutettiin yhdistämällä harvapulssiseen laserkeilausaineistoon ilmakuvatunnuksia sekä hyödyntämällä tarkasti mitattua ja paikannettua maastokoeala-aineistoa. Ilmakuva tuotti tietoa puulajeista ja laserkeilaus puuston määrästä. Puustotunnukset laskettiin ei-parametrisella $k:n$ lähimmän naapurin mallilla, jossa selittävinä muuttujina käytettiin laserkeilainaineiston korkeus- ja tiheystunnuksia sekä ilmakuvan sävyarvo- ja tekstuuritunnuksia. $K:n$ lähimmän naapurin menetelmä valitsee kulloisellekin kohteelle laser- ja ilmakuva-aineiston vastaavuuden perusteella sitä parhaiten kuvaavat tarkasti mitatut koealat. Projektissa tuotettiin keskeisimmät puustotunnukset (puuston tilavuus, pohjapinta-ala, runkoluku, keskiläpimitta ja keskipituus) männyille, kuuselle ja luokalle lehtipuut, johon yhdistettiin kaikki lehtipuulajit. Saadut tulokset olivat puulajeittain vähintään yhtä tarkkoja ja kokonaistunnusten sekä pääpuulajin osalta jopa huomattavasti tarkempia kuin kuvioittaisen arvioinnin maastotarkistuksissa saadut luotettavuusarviot. Esimerkiksi puuston kokonaistilavuuden osalta suhteellinen keskivirhe oli kuviotasolla yleensä noin 10 % ja pääpuulajin kohdalla reilut 20 %.

Laserkeilaustulkinnasta puuttuu kuitenkin tiettyjä keskeisiä puusto- ja metsikkötunnuksia. Suurin ongelma on kenties puuston ikä. Sinänsä kyseinen tunnus on helppo liittää osaksi ei-parametrasta mallia, mutta se edellyttää ikämittauksia maastoreferenssikoaloilta. Toisaalta puuston ikä, kuvion maapohjaa kuvaavat tunnuksot sekä esimerkiksi luontokohteet voidaan ainakin osalla kuvioista johtaa vanhasta inventointitiedosta, jota on kattavasti saatavissa.

Metsälaser-hankkeen toisena keskeisenä tavoitteena oli kehittää puustotunnusten laskentaan hilapohjainen laskentajärjestelmä suuralueille, missä jokaiselle 16×16 metrin hilasolulle lasketaan laser- ja

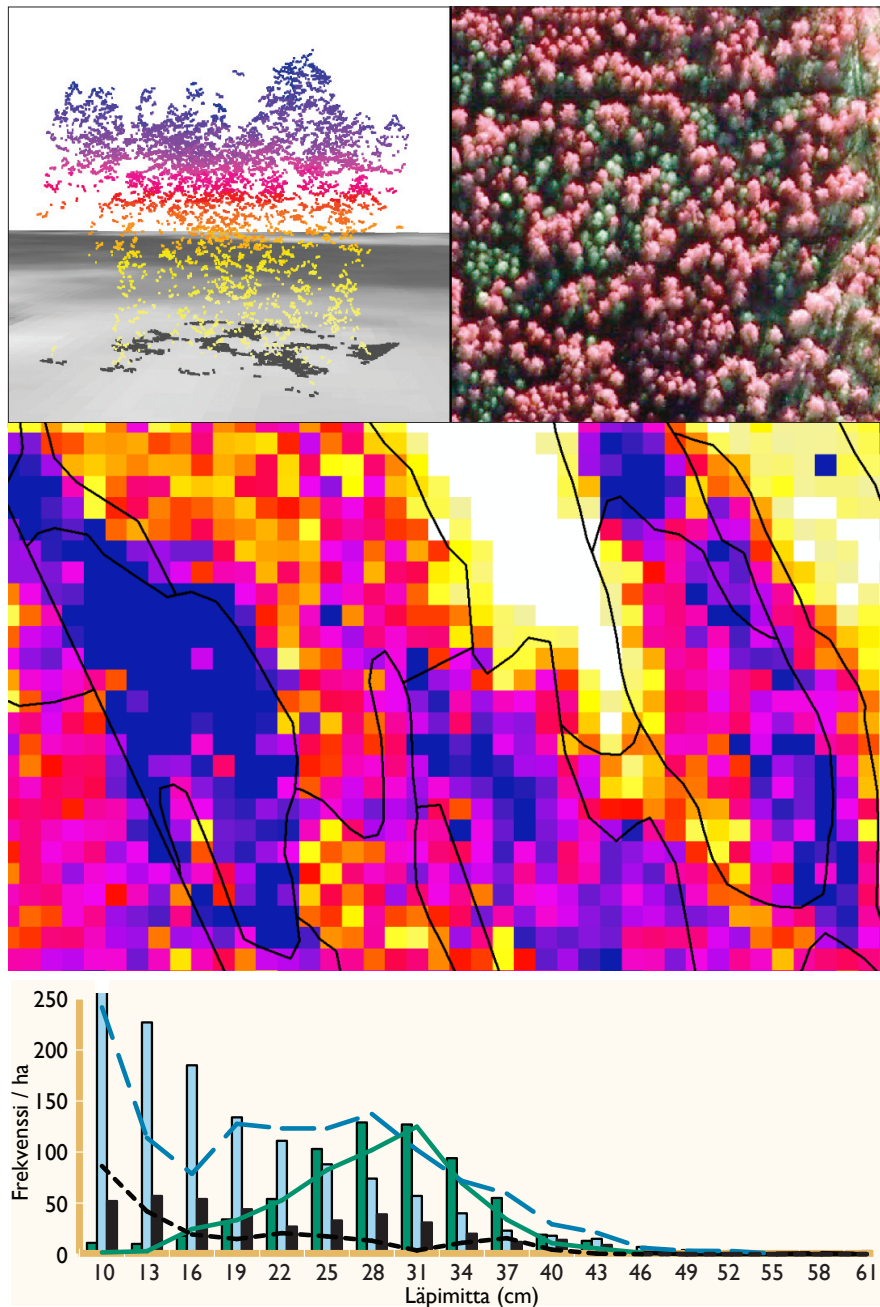
ilmakuvapohjaiset puustotunnukset. Hilan pohjalta puustotunnukset voidaan yleistää kuviotasolle, jolloin aineisto kuvaa myös kuvion sisäistä vaihtelua. Metsälaser-hankkeessa hilalaskenta toteutettiin kahdella laajalla inventointialueella Juuassa ja Kuortaneella. Kattavan hilan sijasta voidaan tulkinnan perusyksiköksi muodostaa myös pinta-alaltaan pienehköjä mikrokuvioita, jotka ovat puustoltaan homogeenisia. Laserkeilauksen tuottama puuston pituus- ja tiheysinforraatio mahdollistaa myös kuvioinnin. Hilan ruuduista tai mikrokuvioista voidaan tulkittujen puustotunnusten perusteella koostaa optimaalisesti suurempia toimenpideyksiköitä.

Hankkeessa kehitetty menetelmä sopii inventointialueelle, jonka koko voi olla useita satojatuhsia hehtaareita. Alueelta tarvitaan kattavat kaukokartoitusaineistot sekä tarkasti paikannettu maastokoeala-aineisto.

Puustotulkinnan kehittäminen

Edellä esitetyssä muodossa laserkeilaus tuottaa puustoinformaatiota summa- ja keskitunnuksina. Tämä ei kuitenkaan ole täysin yhteensopiva nyky-muotoisten kuvioittaisen arvioinnin laskentajärjestelmien kanssa, sillä puustotieto käsitellään niissä puukohtaisesti. Vaikka kuvioittainen arviointi perustuu keskimääräisten puustotunnusten arviointiin, niin laskenta palauttaa puuston käsittelyn puutasolle teoreettisten läpimitajakaumamallien avulla. Vastaavasti nykytilan tunnuksot mukaan lukien puutavaralajit ja edelleen puuston kehitys ennustetaan puukohtaisesti. Näin ollen myös kaukokartoitusjärjestelmien inventointijärjestelmien pitäisi pystyä tuottamaan puukohtaista tietoa. Metsälaserprojektia seuraava TEKES/EAKR rahoitteinen tutkimushanke ”Laserkeilauksen ja ilmakuvien käyttö metsävarojen puu- ja puutavaralajeittaisessa inventoinnissa 2008–2009” (Metsälaser2) vastaa tähän haasteeseen. Hankkeessa ovat mukana Joensuun yliopiston lisäksi jo Metsälaser-hankkeessa mukana olleet UPM Kymmene, Arbonaut ja Metsätalouden kehittämiskeskus TAPIO sekä lisäksi Metsämännut, Metsähallitus ja Ponsse.

Lähtökohtana runkolukusarjojen yleistämiselle laserkeilainpohjaisessa inventoinnissa ovat inventointialueelta mitattavat maastokoealat. Säteeltään



Kuva 1. Periaatteellinen kuva laserkeilauspohjaisen metsäinventointijärjestelmän eri vaiheista. Ylinnä käytetyt kaukokartoitusaineistot: 3D laserpisteaineisto ja ilmakehän kuva, keskellä hilalla ennustettu puuston teemakartta ja alinna yhden hilan läpimittajakaumat puulajeittain (mänty – vihreä yhtenäinen viiva, kuusi – sininen katkoviiva, lehtipuut – musta katkoviiva) verrattuna mitattuihin runkolukusarjoihin (mänty – vihreä pylväs, kuusi – sininen pylväs, lehtipuut – musta pylväs).

yhdeksänmetriset ympyräkoelat sisältävät yleensä kymmeniä puita muodostaen jo melko hyvän otoksen kuvion puustosta. Nämä runkolukusarjat ovat lisäksi paikallisia ja mahdollistavat inventointialueen puuston rakenteen erityispiirteiden kuvaamisen. Kun laserkeilausaineiston avulla ennustetaan puustotunnuksia, hyödynnetään maastokoelajien keski- ja summatunnusten laskennassa nimenomaan näitä jakaumia. Lisäksi jokaiselle puulle mitataan tai ennustetaan pituus. Sen sijaan, että yleistetään ei-parametrisesti kiinnostuksen kohteena olevia puustotunnuksia, voidaan yleistää myös niiden taustalla olevia runkolukusarjoja ja puiden pituuksia (kuva 1). Lopputuloksena nämä jakaumat summautuvat puulajeittain hehtaaritasolle toteuttaen aikaisemmin suoralla mallilla ennustetut puustotunnukset. Laskentajärjestelmissä jokainen hila tai mikrokuvio sisältää tiedon puulajeittaisista jakaumista ja tätä tietoa voidaan yleistää laajemmalle tasolle, esimerkiksi metsikkökuvioille.

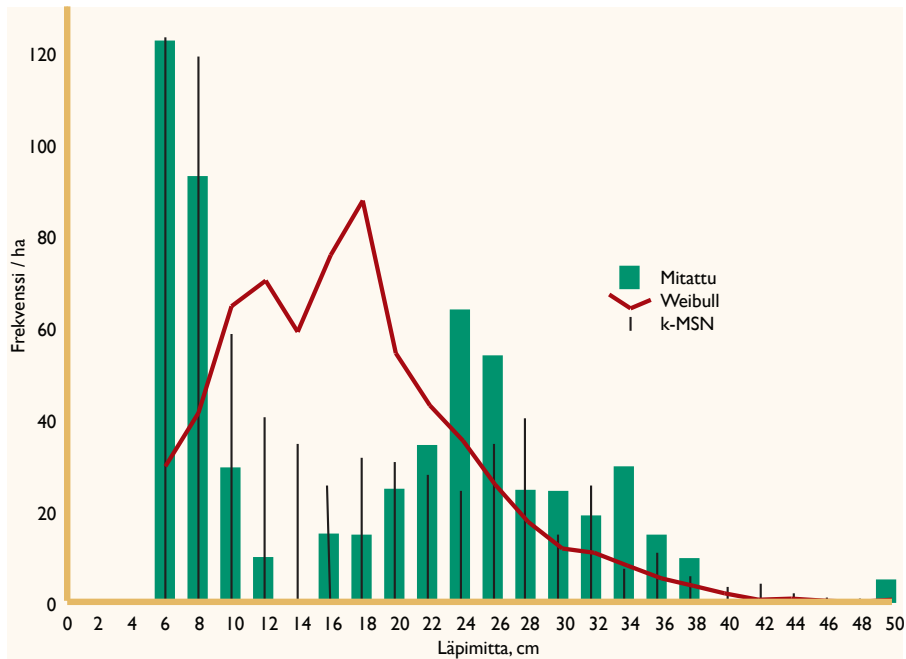
Aivan kuten nykyisessä laskentajärjestelmissä, voidaan lasertulkinnan avulla muodostetusta puujoukosta määrittää puutavaralajeja tai vaikkapa energiapuun osuutta joko runkolukusarjasta tai yksittäisestä puusta. Lähtötieto soveltuu puuston kehityksen ennustamiseen. Laserkeilausinformaatio tuottaa tietoa myös puuston valtapituudesta ja puuston latvusrajatiedon määrittäminen on periaatteessa mahdollista. Kehitysluokan ja toimenpidetarpeen määrittäminen voidaan puolestaan tehdä laskennallisesti puuston järeys- ja tiheystietojen avulla.

Tehdyissä tutkimuksissa ei-parametrinen lähestymistapa on osoittautunut parametriseksi läpimittajakaumamalleja, kuten Weibull-jakaumaa, tarkemmaksi puuston läpimittajakauman kuvaajaksi laserkeilaustulkinnan tapauksessa. Syynä tähän on se, että ei-parametrinen lähestymistapa pystyy paremmin hyödyntämään kaukokartoitustiedon moninaista informaatiota. Lisäksi jakaumat ovat paikallisia eikä informaatiohävikkiä tapahdu jakaumia muodostettaessa. Aikaisemmin kuvioittaisen arvioinnin maastoinventointien vähäisen mittausinformaation (pohjapinta-ala, keskiläpimitta ja -pituus, ikä) perusteella tehdyissä eri läpimittajakaumamallien vertailuissa jakaumamallit ovat yleensä olleet lähes yhtä tarkkoja. Ei-parametristen menetelmien ongelmana on ollut tarvittavan läpimittajakaumien referenssiaineiston olemassaolo ja käytettävyys so-

vellustilanteessa. Laserkeilaustulkinnassa tämä referenssiaineisto on automaattisesti aina olemassa.

Lisäksi erona nykyiseen läpimittajakauman kuvaukseen on se, että nykyisin hyödynnetään pohjapinta-alapainotteisia läpimittajakaumia. Menettely perustuu siihen, että pohjapinta-alan mittaaminen maastossa on varsin luotettavaa ja nopeaa verrattuna muihin puuston tiheystunnuksiin, kuten runkoluvun määrittämiseen. Laserkeilaustulkinnassa tilanne on kuitenkin toinen, sillä kaikki tiheystunnukset, runkoluku, pohjapinta-ala ja puuston tilavuus, saadaan suoraan mallilla ja tuotettu jakauma myös toteuttaa ne täydellisesti.

Empiiristen runkolukusarjojen hyödyntäminen laserkeilaustulkinnassa on luonnollinen ratkaisu puuston läpimittajakauman kuvaamiseksi. Jos tällainen lähestymistapa ei syystä tai toisesta ole käytettävissä, voidaan jakaumat muodostaa myös parametrinen läpimittajakaumamallien, kuten Weibull- tai Johnsonin S_B -funktion avulla. Tähän on periaatteessa kaksi vaihtoehtoa. Joko ennustettuja puustotunnuksia käytetään syöttötietoina valtakunnallisissa jakaumaparametrien ennustemalleissa, kuten nykyisin kuvioittaisessa arvioinnissa runkolukusarjojen tuottamisessa. Erona on vain se, että puustotunnukset ovat kaukokartoituspohjaisia eivätkä maastossa arvioituja. Toinen vaihtoehto on sovittaa inventointialueen maastokoeloihin jokin teoreettinen funktio, jonka parametreja ennustaa suoraan laser- ja ilmakuvatieto. Näiden vaihtoehtojen tapauksessa vaarana on informaation häviäminen sekä jakaumien keskiarvoistuminen valtakunnallisten mallien tai runkolukusarjojen tasoittamisen kautta (kuva 2). Näin ollen paikalliset erityispiirteet jakaumamuuodoissa voivat hävitä, vaikka puuston tilavuuden ennustamisessa tarkkuus olisi samaa luokkaa kuin ei-parametrinen mallin yhteydessä. Lisäksi vaihtoehdossa, jossa ennustetaan jakaumaparametreja paikallisesti laserkeilaustiedon avulla, voi suurena ongelmana olla puulajien erottuminen toisistaan, tämäkin ongelma vältetään ei-parametrinen suoran mallin tapauksessa.



Kuva 2. Kuviotason kuusten läpimittajakaumaennuste ei-parametrisella mallilla sekä tuotettuna Weibull-jakaumalla verrattuna mitattuun runkolukusarjaan. Kuviotason ennuste on yleistetty hilatason jakaumista.

Menetelmän jatkokehitys

Tässä kirjoituksessa esiteltiin menetelmiä johtaa laserkeilaus- ja ilmakuvatiedosta metsäsuunnittelun lähtötietoa erityisesti puuston runkolukusarjoina. Esitetty lähestymistapa on yksi mahdollinen menetelmä tuottaa laserkeilausaineistosta puustotietoa. Kyseinen menetelmä on jo osoittautunut käyttökelpoiseksi suuren mittakaavan toiminnassa ja on jo siirtymässä tuotteistettuna käytännön metsätalouteen. Esitetyn menetelmän edistyneimpiä puolia ovat mahdollisuus puulajikohtaisten tulosten saamiseen sekä puuston kuvaaminen puutasolla paikallisten mitattujen jakaumien avulla. Nykyiseen kuvioittaiseen arviointiin verrattuna menetelmä pitää sisällään niin maastotyöt kuin teoreettisen puujoukon muodostamisenkin.

Esitetyn menetelmän ulkopuolelle jäävät taimikot. Periaatteessa vastaava lähestymistapa toimii ainakin varttuneissa taimikoissa. Metsätalouden tietotarve taimikoista vaihtelee: tarvitaanko tietoa toimenpiteistä vai myös puustotiedot. Lisäksi maastotiedon

keruu taimikoista poikkeaa usein tiedonkeruusta varttuneemmista metsistä ja jos mittaukset taimikoissa eivät ole puutasolla, ei myöskään lopputulos voi olla ilman jo olemassa olevien mallien hyödyntämistä. Laserkeilauksen käyttöä taimikkotiedon tuottamisessa on tutkittu jonkin verran toimenpidetarpeen ja puustotulkinnan osalta ja tutkimus jatkuu parhaillaan.

Laserkeilausaineisto sisältää tietoa myös metsän horisontaalisesta rakenteesta. Tämän tiedon hyödyntäminen on toistaiseksi ollut varsin vähäistä, sillä yleensä hyödynnetään vain pulssin korkeusarvoa, mutta periaatteessa esimerkiksi toimenpidetarpeen ajoitukseen liittyvää tietoa puuston tilajärjestyksestä voitaisiin tuottaa tämän tiedon avulla. Aihepiiri on mukana tutkimusteemana muun muassa Metsälaser2-hankkeessa.

Merkittävä kustannustekijä keilausten tulkinna-
sa on referenssimaastokoealojen mittaaminen. Koealojen on kuvattava inventointialueen puuston vaihtelu ja ollakseen käyttökelpoisia ei-parametrisessa tulkinna-
nassa on koealoja oltava riittävästi erilaisilta maa-

pohjilta, puulajiyhdistelmistä ja puuston kehitysvaiheista. Mahdollisuudet vähentää tarvittavaa koelamäärää liittyvät koalojen optimaaliseen sijoitteluun inventointialueelle vanhan inventointitiedon tai laserkeilausinformaation avulla. Laserkeilausinformaation käyttö edellyttää tietysti sellaista inventointiketjua, jossa kaukokartoitusaineisto on olemassa jo maastotöiden suunnitteluvaiheessa. Kokonaisuudessaan myös tätä asiaa tutkitaan parhaillaan.

Tässä kirjoituksessa keskityttiin aluepohjaisen laserkeilaustulkinnan avulla tehtävän puustotulkinnan kuvaamiseen. Vaihtoehtoinen menetelmä on tunnistaa laserkeilausaineistosta suoraan yksittäisiä puita. Se edellyttää tiheäpulsisempaa laserpisteaineistoa, jonka hyödyntäminen käytännön metsätaloudessa Suomessa ei tällä hetkellä ole kustannusten takia realistista. On kuitenkin nähtävissä, että laserkeilausaineistojen hinnat laskevat jatkuvasti, jolloin hinta ei ole enää kynnyksenä lähestymistävän hyödyntämiselle käytännön metsätaloudessa. Puukohteisissa tulkinnassa on kuitenkin tiettyjä ongelmia, jotka on ratkaistava ennen kuin menetelmää voidaan käytännössä hyödyntää. Nämä ongelmat liittyvät puiden ja puuryhmien tunnistukseen, puulajin määrittämiseen ja puun tunnistuksen, erityisesti läpimitan, ennustamisen tarkkuuteen. Kaikkia edellä mainittuja asioita tutkitaan parhaillaan, mutta kattavia ja käytännön toimintaan soveltuvia ratkaisuja ei vielä ole. Sinänsä jo tulkintavaiheessa tuotettu puukohmainen informaatio sopisi erinomaisesti metsäsuunnittelun lähtötiedoksi. Esimerkiksi puun spatiaalisen naapuruston kuvaus tarjoaa paljon uusia mahdollisuuksia soveltaa puutason spatiaalisia malleja puun kehityksen ennustamisessa, mutta jos puuston tulkinta ei ole riittävän tarkalla tasolla, ei tästä tiedosta ole hyötyä.

Metsätalouden lisäksi laserkeilausinformaatiolla on paljon muita käyttömuotoja. Esimerkiksi Maanmittauslaitos on aloittanut koko Suomen kattavan keilauskorkeusmallituotantoa varten. Tätä tietoa voitaisiin hyödyntää myös metsätaloudessa, mutta koska kuvaus tehdään lehdettömänä aikana, vaikuttaa se laserpulssin heijastumiseen erityisesti lehtipuuvältaisissä metsissä. Tämän ilmiön vaikutusta puustotulkintaan selvitetään parhaillaan Metsätalouden Kehittämiskeskus Tapion koordinoimassa ja Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa hankkeessa ”Kevätlaser metsävarojen inventoinnissa”.

Kirjallisuutta

- Maltamo, M., Suvanto, A. & Packalén, P. 2007. Comparison of basal area and stem frequency diameter distribution modelling using airborne laser scanner data and calibration estimation. *Forest Ecology and Management* 247: 26–34.
- Mehtätalo, L., Maltamo, M. & Packalén, P. 2007. Recovering plot-specific diameter distribution and height-diameter curve using ALS based stand characteristics. Teoksessa: Rönnholm, P., Hyypä, H. & Hyypä, J. (toim.). *Proceedings of ISPRS Workshop Laser Scanning 2007 and Silvilaser 2007*, September 12–14, 2007, Finland. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (Part 3/W52)*: 288–293
- Närhi, M., Maltamo, M., Packalén, P., Peltola, H. & Soimasuo, J. 2008. Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilaus- ja metsäsuunnitelmätietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2008: 5–15.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2008. The estimation of species-specific diameter distributions using airborne laser scanning and aerial photographs. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1750–1760.
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M. & Malinen, J. 2008. Estimating species-specific height-diameter distributions and saw log recoveries from ALS data and aerial photographs: A distribution-based approach. *Silva Fennica* 42: 625–641.
- Prof. Matti Maltamo & Petteri Packalén, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta; Janne Uuttera, UPM-Kymmene Metsä; Esa Ärölä & Juho Heikkilä, Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio
Sähköposti matti.maltamo@joensuu.fi