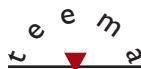


Aarne Hovi ja Ilkka Korpela

# Aaltomuoto – avain laserkeilainhavaintojen syvällisempään ymmärrykseen



## Johdanto

Metsänmittaukselle on tyypillistä epäsuora estimointi, jossa halutut tunnuksat johdetaan havainnoista mallien avulla. Laserkeilaus ei tässä suhteessa muodosta poikkeusta. Maastossa puuston tilavuus saadaan arvioimalla pohjapinta-ala ja keskipituus. Muotokorkeusmallit ovat puulajikohtaisia ja huomioivat täten allometrisia riippuvuuksia (puiden runkomuodon vaste puuston tiheyteen on puulajikohtainen). Laserkeilauksessa puuston tiheys ja pituus saadaan toisaalta latvuston aukkoisuuden ja toisaalta latvuston tuottamien kaikujen korkeusjakauman avulla. Mikäli puulajia ja allometrisia riippuvuuksia (runkolukusarjan ja latvuston geometrian välinen puulajikohtainen riippuvuus) ei tunneta, jää johdettuihin tuloksiin epävarmuutta.

Estimointiprosesseja voi parantaa paremmilla havainnoilla sekä kehittämällä malleja. Laserkeilauksessa havaintojen määrä on lisääntynyt, kun keilaimista on tullut markkinoille toinen toistaan nopeampia versioita. Pääasiallisen havaintoaineiston muodostavat pisteet koordinaatteineen (ns. diskreetit kaiut). Laserkeilauksen ylivoimaisuus joidenkin puustotunnusten ennustamisessa perustuu juuri sen kykyyn tuottaa vaivattomasti tarkkaa kolmiulotteista korkeuspistetietoa. Metsäsovelluksissa käytettävät laserkeilaimet ovat topografisia sensoreita ja optimoituja maan pinnanmuotojen kartoittamiseen. Voidaan kuitenkin perustellusti kysyä ovatko havainnot optimaalisia.

Laserkeilauksessa käytetyt mallit ovat tapauskohtaisia, koska eri keilauskerroilla hankitut aineistot eivät ole vertailukelpoisia. Tämä johtuu keilainten ja keilausasetusten vaihtelusta. Lisäksi käytettävät lähimmän naapurin mallit perustuvat maastokoealoilta tehtyihin kertaluonteisiin mittauksiin. Näemme selkeän tarpeen lähestymistavalle, jossa signaalin fysikaalisperustainen muodostuminen erilaisissa puustoissa ymmärretään, jolloin on mahdollista kehittää yleisiä puustotulkintamalleja, jotka huomioivat keilaimen ominaisuudet, tai, voidaan kehittää erilaisiin tarkoituksiin paremmin sopivia keilaimia. Sama koskee yhtä lailla ilmakuvaukseroita, joiden optimaalisuutta metsän luokittamiseen on viime aikoina selvitetty Suomessakin.

Perinteisten pistehavaintoja tallentavien laserkeilainten lisäksi muutamilla laitevalmistajilla on pitkään ollut käytössä ns. aaltomuodon tallennus. Tämä vaatii runsaasti tiedonsiirto- ja tallennuskapasiteettia, ja aaltomuotolaserkeilaimet ovat yleistyneet vasta viime aikoina. Tässä esityksessä tarkastelemme aaltomuototallennuksen mahdollisuuksia metsien laserkeilauksessa. Seuraavassa luvussa esittelemme pulssiperiaatteella toimivan laserkeilaimen tekniikkaa ja kuvailemme havaintojen muodostumista. Edelleen analysoimme aaltomuodosta laskettavien uusien havaintomuuttujien (-piirteiden) mahdollisia hyötyjä. Lopuksi esitämme mitä hyötyä aaltomuototallennuksesta voisi olla tulkintamallien ja itse sensorien kehittämistyölle.

## Pulssiperiaatteella toimiva laserkeilain

### Keilainten kehityksestä

Laserkeilain on mekaanis-optinen laite, joka lähettää optisesti yhteensuunnatun (kollimoitu), erittäin lyhyen koherenttia (samanvaiheista) valoa sisältävän pulssin, jossa on voimakas hetkellinen teho. Keilaimessa on valolle herkkä ja vasteeltaan nopea ilmaisimien ("pikseli"), jolle kohteesta heijastunut fotonivuo ohjataan lähetetyn pulssin suunnasta kapealta sektorilta siten, että vain lähetyksessä käytetty valon aallonpituus pääsee ilmaisimelle. Tämä vähentää päivänvalon aiheuttamaa kohinaa. Lähetin ja vastaanotin on ajastettu tarkasti, joten signaalin kulkemasta ajasta voidaan laskea etäisyys kohteeseen. Yhtenevää lähetys-vastaanottoa pitää keilatessa poikkeuttaa jatkuvasti, ja keilaimissa on tähän tarkoitukseen oskilloiva tai pyörivä peili. Sen kiertoasento tunnetaan tarkasti. Keilatessa käytetään paikannustekniikkaa, jonka ansiosta valopulssin kulureitti tunnetaan tarkkuudella, joka on noin 5 cm lentokorkeuskilometriä kohti.

Laserkeilaimia on kehitetty tuottavammiksi, jotta ne menisivät kaupaksi. Niitä pitää pystyä käyttämään korkealta ja niiden tulee näytteistää maanpinnan kohteita tiheästi ja tasaisesti. On saavutettu tilanne, jossa laserpulsseja on matkalla useita kerrallaan ja niitä lähetään jopa puoli miljoonaa kertaa sekunnissa (500 kHz). Pulssin huipputeho on rajoittava tekijä, sillä teho pienenee suurilla lähetystaajuuksilla ja johtaa vastaanotossa huonoon signaali-kohinasuhteeseen käytettäessä suuria lentokorkeuksia. Kun pulsseja on ilmassa useita ja vastaanotin joudutaan aina sammuttamaan pulssia lähetettäessä, syntyy tilanne, jossa keilaimella voidaan havaita kohteita vain tietyllä etäisyysvälillä, johon lähetin, vastaanottimen kuunteluaika ja valon nopeudella etenevät pulssit tahdistuvat. Lisäksi poikkeuttava peili on liikkunut saman pulssin lähetys- ja vastaanottohetkien välillä, minkä seurauksena vastaanottimen on "kuunneltava" laajempaa sektoria kohde-tilassa, mikä huonontaa signaali-kohina suhdetta. Uusien keilaimien pulssitiheys ei ole enää kaksinkertaistunut edellisiin malleihin nähden viime vuosina. Valmistajat ovatkin esitelleet tuotepaletteja, joissa on erilaisen mittakaavan kartoitustehtäviin viritettyjä laitteita.

### Mittaustapahtuma

Lähetetyn pulssin ajallinen kesto on 4–10 nanosekuntia eli pituus on 1,2–3 m. Pulssin teho nousee nopeasti huippuarvoonsa, yli 10 kW. Lisäksi pulssilla on keilainkohtainen 0,15–0,5 milliradiaanin avauskulma, joka vastaa 0,15–0,5 m levyistä valaistua alaa eli keilanleveyttä, kun avauskulma määritellään sisältämään 86% energiasta ja keilausetäisyys on kilometri. Pulssi muodostaa siten "katkaistun kartion", jossa teho on suurin pituus- ja poikkileikkaussuuntien keskellä. Aallonpituuden tyypillisiä arvoja ovat lähi-infrapuna-alueen 1064 ja 1550 nm, joille on olemassa tehokkaita lasereita. Luonnonkohteet heijastavat voimakkaasti lähi-infravaloa, mikä vähentää lähetystehon tarvetta ja parantaa silmäturvallisuutta.

Lähi-infravalo vaimenee hieman ilmakehässä ja keilaus vaatiikin kirkkaan sään eikä maanpinnalla saa olla sumupilviä. Kohdatessaan yksittäisen pinnan fotonit joko heijastuvat, absorboituvat tai läpäisevät sen. Kasvillisuudessa heijastuminen tapahtuu tilavuudessa erotuksena tasopintoihin: Puhutaan ns. volumetrisesta takaisinheijastuksesta. Suoraan vastaanotinta kohti saapuva fotonivuo muodostaa signaalin, jota vastaanotin "kuuntelee". Fotonit voivat heijastua useita kertoja kimpoillen latvuksessa edestakaisin jopa niin kaukaa, etteivät näy vastaanottimelle. Yhteen kertaan heijastuneet fotonit muodostavat silti signaalista valtaosan (yli 60%).

Vastaanottimen aukon läpäisevä fotonivuo saapuu peilin ja kaistanpäästösuoitimen kautta yhteen kokoavalle (kollimoivalle) linssille, joka ohjaa sen herkälle ilmaisimelle. Nopeasti vaihteleva sähköinen signaali käsitellään havainnoiksi, miltä osin kaiku- ja aaltomuotolaserkeilaimet eroavat toisistaan. Kaikulaserkeilaimessa käsitellään analogista signaalia tai sen digitoitua versiota ja havaitaan yksittäisiä etäisyyksiä. Kaikuja voi olla useita ja niille tallentuu tuloaika ja signaalin voimakkuus eli intensiteetti. Aaltomuotokeilaimessa signaali näytteistetään suurella taajuudella ja siitä tallennetaan sekvenssejä. Keilaimissa on kynnystysmekanismi, jolla erotetaan merkityksellinen signaali tausta-, digitointi- ja laitekohinasta (taulukko 1). Vastaanotin "herää" tallentamaan varmalta vaikuttavan kaiku- tai aaltomuotosignaalin. Kynnystyksen toiminta ja yhdestä pulssista tallennettujen aaltomuotosekvenssien pituus ja lukumäärä vaihtelevat laitteittain. Jotkut

**Taulukko 1.** Aaltomuodolle tallennettavia ja siitä jälkikäsitellyssä laskettavia muuttujia.

Muuttuja	Yksikkö
<i>Primäärit (laitetason)</i>	
Lähetysaika (GPS-aikaa)	
Laserin ja peilin paikka- ja asentotiedot (pulssin paikka- ja suuntavektori)	pikosekunti
Ensimmäisen amplitudihavainnon havaintoaika	metri, radiaani
Havaintojaksossa (kohinataso ylitetty) tallennetut amplitudihavainnot (yksi tai useampi erillinen aaltomuotosekvenssi)	pikosekunti
– esim. 500 MHz tai 1 GHz näytteenottotaajuudella	digitaalisia numeroita
– esim. 80, 160, 240 tai 256 näytteen sekvenssit	(kalibroimattomia kapean taajuusvälin spektrisiä irradianssiarvoja)
<i>Sekundääriset (laskennalliset)</i>	
Jälkilaskennassa tarkennettu tieto keilaimen sijannista ja asennosta (hierarkiset ja ajasta riippuvat korjaustermit, kalibrointi)	metri, radiaani
Aaltomuodosta laskettuja etäisyyksiä eli kaukuja. XYZ-koordinaatit saadaan ”kulkemalla” saatu etäisyys sensorista pulssin suunnassa	pikosekunti, metri
Kaiuille tai koko aaltomuodolle johdettuja radiometris-geometrisia piirteitä	
– esim. kaiun leveys, amplitudi tai kokonaisenergia	

tallentavat yhden määrämittaisen sekvenssin, kun taas kehittyneemmissä laitteissa sekvenssejä voi olla useampia ja eri pituisia, jolloin vastaanotin voidaan periaatteessa rakentaa herkemäksi, koska ”väärä herätys” maksaa vain lyhyen sekvenssin turhan tallentamisen.

Aaltomuoto on vastaanotetun fotonivuon kuva, johon myös ilmaisimen ja analysointipiirien rajallinen kaistanleveys (hitaus), vastaanottimelle päässyt auringonvalo sekä virtapiireistä ja digitoinnista syntyvä kohina vaikuttavat. Voidaan sanoa, että laitteen tallentama aaltomuoto vastaa laitteen kuvaustarkkuuden rajoissa kohteesta heijastunutta fotonivuota.

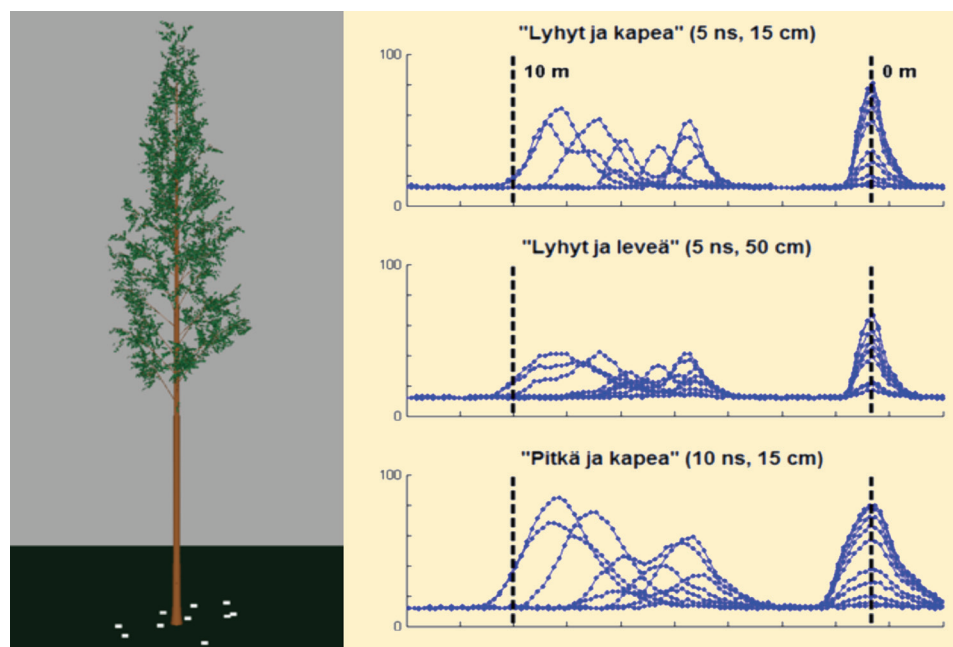
Aaltomuotoon vaikuttavat heijastavien pintojen sijoittuminen syvyysuunnassa sekä pulssin poikkileikkauksessa, niiden pinta-ala, suunnistus sekä kaksisuuntaisheijastusominaisuudet (BRDF, *bidirectional reflectance distribution function*). Koska signaaliin vaikuttavia tekijöitä on enemmän kuin havaintosuureita, voidaan todeta että kohteiden geometria ja radiometria ovat erotettavissa vain, jos käytössä on redundanteja havaintoja (lisätietoa kohteesta tai keilainhavaintoja eri aallonpituudella, avauskulmalla tai lähetetyn pulssin pituuden suhteen).

Kohtisuoralta pinnalta palaava aaltomuoto on sama kuin lähetetyn pulssin. Aaltomuoto pitenee, jos pulssin valaisemia pintoja on useita pulssin syvyysuunnassa tai pinnat ovat kallistuneita. Teoriassa kaksi pintaa voidaan erottaa aaltomuodosta, jos niiden etäisyys toisistaan on vähintään puolet lähetetyn pulssin pituudesta. Syvyysuuntaisen sijoittumisen

lisäksi on merkitystä sillä, kuinka pinnat sijaitsevat valaistussa poikkileikkauksessa, jossa fotonitiheys on suurin keskellä. Poikkileikkauksessa «reunalla» sijaitseva kohde tuottaa siten heikomman fotonivuon kuin keskellä sijaitseva. Ilmiö on havaittavissa esimerkiksi sähkölinjoissa. Pinta-alan vaikutus on yksikäsitteinen: Mikäli muut tekijät pysyvät vakioina, kohteesta heijastuneen fotonivuon voimakkuus kasvaa aina pinta-alan kasvaessa.

Pintojen suunnistuksella ja BRDF-ominaisuuksilla on suuri vaikutus. Mattapinnalta heijastuneen säteilyn määrä pinta-alayksikköä kohti vähenee valaisukulman kasvaessa. Laserin lähettämän koherentin säteilyn heijastusominaisuuksista tiedetään kuitenkin hyvin vähän minkäänlaisissa kohteissa, koska laboratoriomittaukset tarkassa takaisinsironnassa ovat vaikeita toteuttaa. Luonnonpinnat muistuttavat mattapintoja, mikä on usein oletusgeometris-optisissa simulointimalleissa. Sama oletus pätee myös lehden läpäisseen valon siroamisuuntien osalta. Peiliheijastuksia näkee yleensä vain vinoilta rakennetuilta pinnoilta.

Pintojen heijastusominaisuudet (reflektanssi, transmittanssi, BRDF) vaihtelevat kasvilajista toiseen. Koska ensimmäisen kertaluokan säteily muodostaa valtaosan vastaanotinta kohti palaavasta fotonivuosta, voidaan karkeasti sanoa, että heijastavuuden eli reflektanssin kaksinkertaistuu tallennetun aaltomuodon amplitudi kaksinkertaistuu. Myös useampaan kertaan sironneilla fotoneilla on jonkin verran merkitystä, joten voimakas absorptio



**Kuva 1.** Synteettisesti tuotettuja aaltomuotoja 10-metrisestä koivusta eri keilausparametreilla. Keilaus on simuloitu kohtisuoraan ylhäältä. Valkoiset pisteet osoittavat pulssien leikkauspisteitä maanpinnassa. Aaltomuodoissa nähdään takaisinsirontaa sekä latvuksesta että maanpinnasta. Amplitudihavainnot on tehty nanosekunnin välein. Katkoviivat osoittavat maan ja latvan paikat. Kuvaajien yläreunassa ilmoitetaan lähetetyn pulssin pituus ja keilanleveys kohteessa.

suhteessa pinnoilta sironneiden (heijastuneiden tai läpäisseiden) fotonien määrään heikentää palaavaa fotonivuota, koska fotonit ”sammuvat” kasvustoon. Myös kasvuston rakenne eli pintojen sijoittuminen vaikuttaa todennäköisyyteen, jolla useaan kertaan sironnut foton palaa kohti vastaanotinta. Lähi-infravalon korkeasta heijastavuudesta ja usean keraluokan heijastuksista johtuen rakenne vaikuttaa signaaliin enemmän kuin näkyvän alueen valolla, jossa kasvillisuus on tummaa. Lähi-infrasäteily myös absorboituu voimakkaasti kosteisiin pintoihin, joten keilauksen aikaisilla kosteusolosuhteilla on merkitystä.

Sensorin ominaisuuksista aaltomuotoon vaikuttavat keilanleveys, lähetetyn pulssin pituus ja käytetty aallonpituus.

Keilanleveyden kasvattaminen lisää valaistuun alaan osuvien kohteiden (oksien tms.) määrää. Olemme havainneet, että keilanleveyden kasvaessa välillä 15–60 cm aaltomuodon huippujen (kaikujen) määrä kasvaa. Toisaalta hyvin suurella keilanleveydellä

aaltomuoto kuvaa latvusbiomassan korkeusprofiilia, joka on pikemminkin jatkuva, eikä yksittäisiä oksia enää havaita erillisinä kaikuina. Viitteitä tästä näkyy kuvassa 1. Lisäksi keilanleveyden kasvaessa pienet erilliset kohteet eivät enää välttämättä tuota kohinatason ylittävää signaalia, ellei lähetystehoja kasvate-ta, mille on teknisiä ja silmäturvallisuuden liittyviä rajoitteita. Eri keilanleveydellä tehtyjä havaintoja yhdistelemällä (edellä todettu havaintoredundanssi) voidaan saada kasvillisuuden rakenteesta esille enemmän.

Lähetetyn pulssin pituuden kasvattaminen pienentää sensorin etäisyserotuskykyä, koska syvyysuunnassa lähellä toisiaan sijaitsevat pinnat summautuvat toistensa päälle (kuva 1).

Käytetyllä aallonpituudella on suuri vaikutus pintojen heijastusominaisuuksiin. Esimerkiksi lehtien ja neulasten heijastavuus puolittuu aallonpituuden kasvaessa arvosta 1064 nm arvoon 1550 nm. Veden absorptio kasvaa myös voimakkaasti aallonpituuden funktiona. Aaltomuodon tulkinnan kannalta on

olennaista, muuttuvatko aallonpituuden muuttuessa myös kohteiden heijastusominaisuudet suhteessa toisiinsa. Jos näin on, useammalla aallonpituudella tehtyjä keilauksia voidaan hyödyntää kohteiden ominaisuuksien tulkinnassa (havaintojen redundanssi).

### Aaltomuotojen kertomaa

Tutkijoita kiinnosti aluksi lisäpisteiden irrottaminen aaltomuotojen avulla. Käytännössä nämä ovat latvuston sisältä saatavia ”välিকাikuja”, jotka kasvattavat keilauksen pistetiheyttä lentokustannuksia lisäämättä. Kuten edellä on todettu, aaltomuodon huippujen määrä on riippuvainen lähetetyn pulssin pituudesta. Kokemustemme mukaan 4 ns pulssilla (Riegl LMS-Q680i -keilain) voi matalalta lennetäessä (hyvä signaali-kohinasuhde) tuottaa jopa 10 huippua aaltomuotoa kohti, jolloin ero vanhempiin, ensimmäisen ja viimeisen kaiun tallentaviin keilaimiin on merkittävä. Sen sijaan neljän diskreetin kaiun tallennukseen pystyvällä Leica ALS60/70 -keilaimella (kaikulaser, jossa on optiona aaltomuodon tallennus), jossa lähetetyn pulssin pituus on 7–10 ns, aaltomuotoanalyysi ei juuri tuota lisäpisteitä metsää keilattaessa. Yhtenä vaihtoehtona on käyttää signaalinkäsittelytekniikkaa (ns. dekonvoluutio) poistamaan pulssin pituudesta ja vastaanottimen hitauteista aiheutuvaa kohteiden sekoittumista. Tällöin kyky erottaa lähellä toisiaan olevia kohteita voi olla jopa 10-kertainen verrattuna raaka-aaltomuotoon. Vaatimuksena on kuitenkin, että lähetetyn pulssin aaltomuoto tunnetaan.

Aaltomuodosta laskettavissa olevat radiometris-geometriset piirteet ovat herättäneet mielenkiintoa. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi kohteiden luokitukseen tai sen ominaisuuksien mittaamiseen (puulajiluokitus, hyönteistuhot, harsuuntuneisuus ym.). Aaltomuotopiirteiden käyttöä metsien ja urbaanien ympäristöjen luokitukseen on tutkittu Keski-Euroopassa. Suomessa ensimmäisiä tutkimustuloksia on saatu vasta äsken. Puulajin tunnistaminen, yksittäisen puun tapauksessa, on konkreettinen osa-alue, jossa aaltomuodosta on etua ja jossa jo suhteellisen yksinkertaiset aaltomuotopiirteet ovat osoittautuneet toimiviksi. Lisäksi on viitteitä siitä, että jotkin aaltomuotopiirteet ovat käyttökelpoisia, vaikka pulssitiheys olisi pieni. Tämä on lupaavaa käytän-

nössä sovellettavaa aluepohjaista tulkintamenetelmää ajatellen. Toinen mahdollinen sovellusala on taimikoiden mittaaminen. Yksittäinen aaltomuoto kertoo kasvillisuuden rakenteesta pienessä mittakaavassa. Olemme havainneet, että erilaisten taimikkokasvillisuustyyppien erottuvuus on aaltomuodolla parempi kuin diskreetillä pisteaineistolla.

Lisäpiirteiden tuomien parannusten ohella ei pidä väheksyä uudenlaisen aineiston mahdollisuutta viedä tutkimusta kohti uusia ajattelutapoja. Tällainen on esimerkiksi tulkita laseraineistoa pisteiden sijaan vektoreiksi. Laserpulssi sisältää tietoa pulssin kulkureitillä olleesta tyhjästä tilasta (kasvillisuuden komplementti). Idea sinänsä ei ole uusi, mutta aaltomuotoaineistojen käyttöönoton myötä se yleistyy. Toinen kiinnostava mahdollisuus on käyttää aaltomuotoa apuna etsittäessä yksittäisiä puita. Puiden löytymisen paraneminen toisi parannusta runkolukusarjan ja sitä kautta metsän arvon määrittäykseen. Esimerkiksi aaltomuodon energia vähenee puun latvuksen reunoja kohti, mitä voisi hyödyntää puiden erottamisessa radiometris-geometrisenä lisäpiirteinä. Muutenkin aaltomuoto mittaa latvuksesta heijastuneen energian tilajakaumaa kaikulaseria tarkemmin. Tätä jakaumaa tulkitsemalla voidaan saada tietoa mm. lehvästön ryhmittyyneisyydestä. Tästä voi, parantuneen puulajitulkinnan kautta saatavien allometristen suhteiden tarkentumisen lisäksi, olla hyötyä esimerkiksi biomassan ja lehtialaindeksin mittaamiseen.

Pistetiheyden kasvattamisen sekä uusien piirteiden ja tulkintamenetelmien lisäksi kolmas tärkeä aaltomuototallennuksen tuoma lisähyöty on, ainakin teoriassa, parempi mahdollisuus keilausten väliseen kalibrointiin. Tunnettaessa lähetetyn pulssin muoto voidaan johtaa tallennetusta aaltomuodosta kohteen vaste. Teoriassa tämä (ns. tutkapoikkipinta-ala tai takaisinheijastuskerroin) on keilaimen ominaisuuksista ja asetuksista riippumaton. Kalibroinnin avulla lasertulkintamallien aineistosidonnaisuus vähenisi ja eriaikaisista keilauksista tehtävä muutostulkinta mahdollistuisi entistä paremmin. Kalibrointiin liittyy kuitenkin joitakin ongelmia johtuen siitä, että metsäkasvillisuus poikkeaa teoreettisesti ideaalisista piste- tai tasomaisista kohteista. Lisäksi aallonpituus vaikuttaa kohteen vasteeseen heijastusominaisuuksien muuttuessa. Käytännön kokeita tarvitaan selvittämään miten merkittäviä nämä vaikutukset ovat.

## Kohti metsään viritettyjä sensoreita ja fyysikaalisperusteisia tulkintamenetelmiä

Sensoriin ja lennon suunnitteluun liittyvät parametrit vaikuttavat jossakin määrin kalibroituhiinkin laserhavaintoihin. Nämä, toisaalta häiritsevät vaikutukset, voidaan myös kääntää hyödyksi. Olemme esimerkiksi saaneet viitteitä, että puulajien erottuvuus paranee yhdistämällä eri aallonpituuksien havaintoja. Eri keulanleveyksillä tehtyjen havaintojen käyttö kasvillisuuden rakenteen mittaukseen on myös aihe, jota on syytä selvittää tarkemmin.

Aaltomuototallennuksen mahdollistaman läpinäkyvän mittaustapahtuman ansiosta on aiempaa helpompaa päätellä, miten keilain- ja keilausparametrit vaikuttavat saatuihin havaintoihin. Tulkintamenetelmien kehityksen ohella tämä mahdollistaa uusien laitteiden määrittelyn paremmin metsänmittaukseen soveltuviksi. Laitekehityksessä voidaan mittaushavaintojen lisäksi käyttää apuna fyysikaalisia simulointimalleja. Tällöin vältetään kalliiden prototyyppilaitteiden rakentamiselta. Yksityiskohtaiset mallit (kuva 1), jotka kuvaavat puita jopa lehtien tai neulasten tarkkuudella, yleistyvät tietokoneiden kapasiteetin kasvaessa. Mallien avulla voidaan muodostaa virtuaalimetsiä. Nämä toimivat ”laboratoriona”, jossa mittaustapahtumaan vaikuttavia tekijöitä voidaan kontrolloida. Tällöin päästään eroon empiiristen aineistojen ongelmista, kalleudesta ja ainaisista puutteista. Joitakin muuttujia, kuten lehti-alaindeksi tai lehtibiomassa, on myös hyvin vaikea mitata maastossa riittävän tarkasti.

Kasvillisuuden realistinen mallinnus vaikeuttaa simulointimallien käyttöä, ja mittaushavaintoja tarvitaan vielä pitkään mallien tueksi. Simulointimallien kehitys on kuitenkin lupaava tutkimussuunta. Laitekehityksen lisäksi se vastaa tarpeeseen kehittää yleisiä aineistoriippumattomia lasertulkintamalleja. Fyysikaalisia malleja on toistaiseksi käytetty lasertulkinnassa kohtalaisen vähän. Yksi tekijä on ehkä ollut havaintojen pienestä mittakaavasta johtuva tarve erittäin yksityiskohtaisille malleille. Toisaalta laserkeilauksessa valonlähde on käyttäjän kontrollissa ja katselusuunta yhtyy pulssin suuntaan. Tämän takia mitattuja ja mallinnettuja havaintoja ja siten mallien luotettavuutta on helppo vertailla. Uskommekin, että fyysikaalinen mallintaminen tulee yleistymään laserkeilaushavaintojen tulkinnessa.

## Yhteenveto

Ensimmäisestä Suomessa tehdystä aaltomuotokeilauksesta lähtien saadut kokemukset ovat osoittaneet, että aaltomuotolaser on tutkijalle oivallinen työkalu. Aaltomuotojen avulla tapahtuva perehtyminen laserkeilaimen mittaustapahtumaan lisää ymmärrystä havaintoihin vaikuttavista tekijöistä ja mahdollistaa uusien tulkintamenetelmien kehityksen. Aaltomuotohavainnot sisältävät diskreettejä kaikuja tarkempaa tietoa kohteesta, ja niiden avulla mm. puulajintunnistuksen tarkkuutta on onnistuttu parantamaan. Tulkintamenetelmien ohella metsään optimoitujen keilainlaitteiden kehitys on lupaava tutkimusaihe. Laitekehitystyössä teoreettinen simulointi on tärkeässä osassa. Samalla simulointi vie kohti fyysikaalisperusteisia tulkintamenetelmiä, jolloin päästään eroon lasertulkintamallien aineistosiidonaisuudesta.

## Kirjallisuutta

- Baltsavias, E. P. 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(2–3): 199–214.
- Hovi, A. & Korpela, I. 2014. Real and simulated waveform-recording LiDAR data in juvenile boreal forest vegetation. *Remote Sensing of Environment* 140: 665–678.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. & Maltamo, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1339–1366.
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T. & Studnicka, N. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60(2): 100–112.
- Wehr, A. & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(2–3): 68–82.

■ MMM Arne Hovi & MMT dos. Ilkka Korpela, Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos  
Sähköposti [arne.hovi@helsinki.fi](mailto:arne.hovi@helsinki.fi)