

Mikko Vastaranta, Eija Honkavaara, Ninni Saarinen,  
Markus Holopainen ja Juha Hyyppä

# Tuuli- ja lumituhojen kartoitus ja mallinnus useampiaikaisten kaukokartoituspintamallien avulla



Luonnonvarariskien hallinta

## Johdanto

Metsätuhoihin liittyvät riskit, kuten kuivuus-, lumi-, tuuli- ja hyönteistuhot ovat lisääntyneet. Tuhot vaikuttavat metsätalouden kannattavuuteen. Esimerkiksi tuulituhot voivat aiheuttaa merkittäviä taloudellisia tappioita lyhyessä ajassa. Tällaisissa tapauksissa tarvitaan menetelmiä laajojen alueiden nopeaan ja tarkkaan kartoitukseen. Tuulituhoille alttiiden metsiköiden kartoitus tuottaa tietoa, jota voitaisiin hyödyntää myös metsänhoidossa. Lain-säädäntö velvoittaa metsänomistajaa korjaamaan tuhoutuneen puuston, jotta esimerkiksi tuulituhojen seurauksena hyönteistuhot eivät pääsisi leviämään. Tietoa tuhoutuneen puustoon määrästä ja laadusta tarvitsevat siis metsänomistajien lisäksi myös viranomaiset.

Yksityiskohtainen kolmiulotteinen (3D) kauko-kartoitus tarjoaa menetelmiä tuulituhojen inventoin-tiin, kartoitukseen ja seurantaan. Laserkeilauksella tai ilmakuvilta voidaan tuottaa metsikön rakennetta kuvaava pistepilvi tai pintamalli (*Digital Surface Model*, DSM). Laserkeilauksella voidaan tuottaa lisäksi tarkka maanpinnan korkeutta kuvaava maas-tomalli (*Digital Terrain Model*, DTM). Metsikön latvusmalli (*Canopy Height Model*, CHM) saadaan vähentämällä pintamallista (DSM) maaston korkeus (DTM).

Tuuli- ja lumituhot muuttavat metsikön 3D-ra-kennetta. Myrskytuuli tai lumi kaataa useimmiten kokonaisia puita tai katkoo niiden latvoja. Tuotettu-

jen pintamallien (DSM, CHM) erotuskyky (resoluutio) vaihtelee XY-tasossa noin paristakymmenestä senttimetrinä muutamaan metriin ja Z-tasossa noin puolesta metristä metriin pintamallin tuottamisme-netelmästä riippuen. Näin ollen tuulituhoja pysty-tään erottamaan useampiaikaisten 3D-pintamallien avulla. Pintamallien erotusmenetelmien käytännön hyödyntämistä rajoittaa useampiaikaisten yksityis-kohtaisten pintamallien saatavuus eli temporaalinen resoluutio. Ongelmallista on myös erottaa puuston kasvu ja metsänhoidolliset toimenpiteet tuhojen aiheuttamista muutoksista.

Tuulituhoriskiin vaikuttavia tekijöitä tunnetaan entuudestaan varsin hyvin. Niitä ovat muun muassa puuston pituus, ikä, puulaji, runkomuoto, latvuston koko, juurten elinvoimaisuus, maan kosteus, ojitus, lannoitus, metsänhoito ja topografia. Laserkeilauksella voidaan kartoittaa useita näistä edellä mai-nituista tuulituhoriskiin vaikuttavista tunnuksista. Lisäksi metsikön latvustoa kuvaava latvusmalli (CHM) sisältää jo suoraan yksityiskohtaista mitta-ustietoa latvuston korkeudesta ja tiheydestä, kun taas maanpinnan korkeutta kuvaavasta maastomallista (DTM) voidaan laskea suoraan topografiaa kuvaavia tunnuksia. Kaukokartoitustulokinnalla saatua tietoa voidaan siis hyödyntää lähtökohtana tuhojen syiden analysoinnissa, jota voidaan tehdä spatiaalisen tilas-totieteen ja paikkatietojärjestelmien avulla.

Tässä artikkelissa esitellään kaukokartoitukseen perustuvia menetelmiä useampiaikaisten 3D-pinta-mallien tuottamisessa sekä tarkastellaan eri me-

netelmien tarkkuutta tuulituhojen kartoituksessa ja seurannassa. Lisäksi esitellään 3D-kartoituksen mahdollisuuksia tuulituhojen riskimallinnuksessa.

## Menetelmät pistepilviaineistojen tuottamiselle

### Laserkeilaus

Laserkeilaus voidaan jo nykyisin nähdä tunnetuimmaksi menetelmäksi tuottaa mitattavasta kohdealueesta kolmiulotteinen pisteaineisto, jossa jokaisella pisteellä on sekä x- ja y-koordinaatit että korkeus merenpinnasta (z). Metsien laserkeilauksessa yleisesti käytetyt lentokorkeudet vaihtelevat 400 m–4000 m maanpinnan yläpuolella, jolloin laserkeilan koko maanpinnalla on laitteesta riippuen 0,1 m–2 m. Yleisimmin käytetty keilaus avauskulma nadiirista (zeniitin vastakohta, piste suoraan alhaalla taivaanpallolla) lentosuuntaa vastaan on noin 15 astetta, jolloin lentolinjan leveys maastossa on 100 m–1000 m. Lentolinjojen välille suunnitellaan yleensä 10–50 % sivupeitto. Lopullinen pistepilvi muodostuu lähetettyjen pulssien paluukaiuille lasketuista x, y, ja z-koordinaateista. Käytetyt pulssitiheydet vaihtelevat 0,5–20 pulssia/m<sup>2</sup> ja yhdestä pulssista saadaan yleisimmin yhdestä neljään paluukaikua (pistettä), mutta uusimpia prosessointitekniikoita hyödyntämällä jopa huomattavasti enemmän. Pistepilven lisäksi siitä tuotetut maastomalli ja latvusmalli voidaan nähdä laserkeilausperustuotteiksi. Käytännössä nämä ovat rasterimuotoisia karttatasoja, joiden resoluutio vaihtelee 0,5 m–2 m. CHM-rasteri muodostetaan antamalla jokaiselle rasterisolulle arvo korkeimmasta ensimmäisestä paluukaikusta. Näin CHM kuvaa puuston pituutta. Vastaavasti DTM:n muodostamisessa hyödynnetään viimeisiä kaikuja, jotka tulevat maasta. Rasterisoluille, joista ei ole suoraa maanpinnan korkeuden tai puuston pituuden havaintoa, interpoloidaan arvo ympäröivien rasterisolujen tietojen avulla. Interpoloitujen solujen määrä riippuu käytetyistä laserkeilausparametreistä (lentokorkeus, keilauskulma, pulssitiheys jne.) ja metsikön rakenteesta. Tavoitteena kuitenkin on, että mahdollisimman monesta rasterin solusta olisi suora mittaushavainto, eikä interpolointia tarvittaisi. Rasterin solukoko tulee siis sovittaa käytettyyn

pulssitiheyteen.

Laserkeilaus vahvuus on, että samalla tekniikalla saadaan havainnot sekä puuston latvuksista että maanpinnasta. Suomi laserkeilataan kokonaisuudessaan todennäköisesti kuluvan vuosikymmenen aikana. Tekniikan kehittyessä lentolaserkeilausta pystytään tekemään entistä korkeammalta, mikä pienentää aineiston hankintakuluja. Toisaalta, kun laserkeilausella saadaan tuotettua tarkka maastomalli, niin latvusmalli voidaan tuottaa myös muilla vaihtoehtoisilla menetelmillä (ks. seuraavat luvut ilmakuvista ja satelliittikuvista).

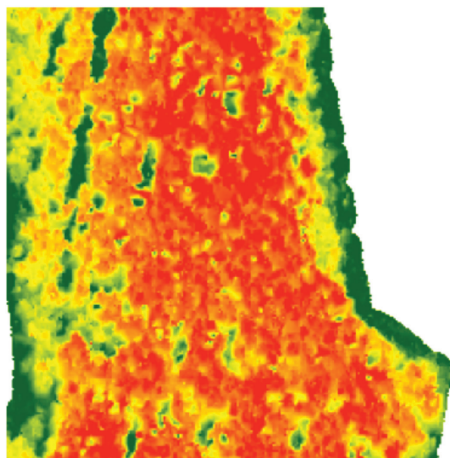
### Ilmakuvat

Topografinen kartoitus on kehittyneissä maissa laajalti perustunut jo toisesta maailmansodasta lähtien ilmakuvilta tehtävään stereokartoitukseen. Viimeaikoina ilmakuvauksen sensoritekniikka ja ilmakuvien prosessointitekniikka ovat kuitenkin kehittyneet voimakkaasti mahdollistaen niiden soveltuvuuden myös erilaisiin metsien kartoitustarpeisiin.

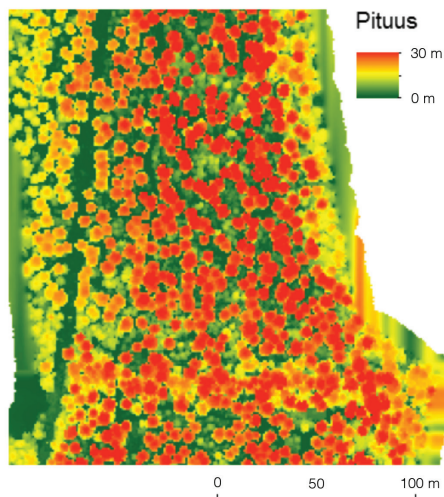
Digitaalinen sensoritekniikka on kypsynyt ja modernit kamerat tuottavat laadukkaita ja kohinattomia kuva-aineistoja, jonka lisäksi ilmakuvaukseen suunniteltujen fotogrammetristen laaja- ja keskiformaattisten kameroiden ohella myös kuluttajakameroilla voidaan tuottaa tarkkoja ilmakuvauksaineistoja. Lisäksi 3D-kaupunkimallinnuksen tarpeet ovat tuoneet markkinoille pysty- ja viistokuvauksenyhdistäviä kameroita, jotka mahdollistavat laajempien pituus- ja sivupeittoprosenttien hyödyntämisen katvealueiden minimoimiseksi. Miehitetyistä lentoaluksista tapahtuvan kuvauksen ohella lennokkipohjaiset kartoitustekniikat ovat yleistyneet.

Ilmakuvauksessa kerätään tyypillisesti useasta kuvajonosta muodostuvia ilmakuvablokkeja, joiden tarkoitus on kattaa mahdollisimman laaja alue, mahdollistaa tehokas orientointiprosessointi sekä tuottaa stereoskooppinen näkymä kohteeseen. Ilmakuvablokkeissa pituuspeittoprosentti on ollut tyypillisesti noin 60 % ja sivupeittoprosentti 20–40 %. Digitaalisen kuvaustekniikan myötä pituuspeittoprosenttia on voitu kasvattaa ilman merkittäviä kustannuksia, ja nykyään käytetään usein 80–90 % pituuspeittoja. Myös sivupeittoprosenttia kasvatetaan usein sen vaihdellessa 30–80 % välillä.

Ilmakuvapintamalli



Laserkeilauspintamalli



**Kuva 1.** Ilmakuva- ja laserkeilauspintamallit, joista molemmista on vähennetty laserkeilauksella tuotetun maastomallin korkeus. Laserkeilaus havaitsee latvusaukot yksityiskohtaisemmin.

Ilmakuvien yhteensovitusmenetelmät ovat kehittyneet voimakkaasti viime aikoina ja niitä on käytetty kolmiulotteisten pistepilvien muodostamiseen (vrt. laserkeilaus). Ilmakuvien maastoresoluution (*Ground Sample Distance*, GSD) vaihdellessa noin 5 cm ja 1 m välillä, voidaan pistepilviä tuottaa 1–400 piste/m<sup>2</sup> pistetiheyksillä. Vaatimus ilmakuvaukseen perustuvassa korkeusmittauksessa on, että kohde tulee havaita vähintään kahdella kuvalla. Metsäalueilla korkeustietoa saadaan näin ylimmän latvuserroksen latvoista, mutta vähemmän maanpinnasta sekä keskikerroksista. Keskeiset läpäisevyyteen vaikuttavat tekijät metsäalueilla ovat kasvillisuuden tiheys sekä kuvien resoluutio. Pääsääntöisesti ilmakuvaukseen perustuva menetelmä ei siis ole luotettava maanpinnan korkeuden havaitsemiseen metsäalueilla. Ilmakuvien avulla muodostettu pintamalli voidaan kuitenkin yhdistää laserkeilauksen avulla tuotettuun maanpintamalliin, kuten Maanmittauslaitoksen Suomesta tuottama valtakunnallinen korkeusmalli, jolloin ilmakuvapintamalli soveltuu puustoon pituuden mittaamiseen (kuva 1).

Geometristen ominaisuuksia ohella on tapahtunut myös merkittävää kehitystä kuvauslaitteiden radiometrisissa ja spektraaleissa ominaisuuksissa. Digitaalinen kuvaustekniikka mahdollistaa suuret

signaalikohinasuhteet, minkä seurauksena saavutetaan tarkka radiometrinen laatu myös varjoissa. Ilmakuvakamerat kuvaavat usein sinisellä, vihreällä, punaisella ja lähi-infrapun aallonpituusalueilla, ja tuottavat näin samanaikaisesti väri- ja väärävärikuvia. Kun ilmakuvien radiometria korjataan tarkoilla menetelmillä, voidaan kuvat käsitellä reflektanssikuviksi, jotka parantavat sävyarvoihin perustuvien analysointimenetelmien käytettävyyttä. Radiometrisen laadun kehittymien parantaa analysointimenetelmien automaattisuuden kehittymistä.

Laserkeilaukseen verrattuna ilmakuvauksen etu laajoilla alueilla on yleisesti ottaen parempi kustannustehokkuus. Pienemmillä alueilla voidaan puolestaan saavuttaa hyvä kustannustehokkuus käyttämällä edullisia kuluttajakameroita joko pienlentokoneista tai lennokeista käsin. Ilmakuvilla on mukana myös sävytieto ja visuaalinen kuvainformaatio, mitkä parantavat aineistojen tulkittavuutta.

#### Satelliittikuvat

Korkean resoluution satelliittikuvat sekä SAR (*Syn-teettisen Apertuurin Tutka* eli suuren laskennallisen läpimitan tutka) -kuvaukseen perustuvat menetel-

mät ovat vaihtoehtoisia tapoja tuottaa pintamalleja. Pintamallien resoluutiot ovat kuitenkin tällöin karkeampia, yleisimmin n. 5–10 m, mutta menetelmien etuna on hyvä ajallinen resoluutio. Tällaisia aineistoja voisi olla mahdollista saada jopa viikoittain. SAR-tutka on aktiivinen kuvauslaite, joka lähettää pulssin kohteeseen ja mittaa kohteesta takaisinsironneen säteilyn aaltomuodon amplitudin ja vaiheen. SAR-kuvista pintamalli voidaan tuottaa mittaamalla takaisinsironneen säteilyn vaihe-eroja (*interferometria*) tai hyödyntämällä useammalta tutkakuvalta tehtävää stereomittausta (*radargrammetria*). Tutkakuvilta tehtävä stereomittaus on periaatteessa hyvin samanlaista kuin ilmakuvien stereomittaus (*fotogrammetria*).

Myös optisen alueen satelliittikuvien resoluutio on parantunut merkittävästi ja useat laitteet tuottavat tänä päivänä kuva-aineistoja 0,5 m tai sitä paremmalla maastoresoluutiolla. Monet satelliittikuvat voidaan tilata stereopeitolla, jolloin niiltä voidaan tuottaa korkeusmalleja ja pistepilviä kuvansovitusmenetelmillä vastaavasti kuten ilmakuvilta. Näiden korkeusmallien laatu vastaa ilmakuvilta tuotettujen korkeusmallien tarkkuutta, tosin pidemmästä kuvausetäisyydestä ja tyypillisesti heikommasta geometriasta johtuen laatu saattaa jäädä hieman huonommaksi kuin ilmakuvakameroilla. Näkyvän valon alueella toimivien satelliittilaitteiden merkittävä ongelma on pilvisyys. Kuvia pitäisi saada käytännössä pilvettömään aikaan. Ilmakuvauksessa voidaan kuvaus suorittaa joustavasti silloin kuin pilviä ei ole tai pilvien alapuolelta, mutta kaupallisten satelliittien ylitysaikoja ei ole mahdollista optimoida pilvettömään aikaan. Satelliittien hyöty on kuitenkin globaali kattavuus. Yhdysvallat on äskettäin laskenut pienimmän sallitun kaupallisten satelliittien GSD:n 0,5 metristä 0,25 metriin, mikä merkitsee jälleen uusia mahdollisuuksia. Myös Google on äskettäin hankkinut kaupallisen satelliittiyhtiön ja Google Skybox:n suunnitelmissa onkin laukaista vuoteen 2018 mennessä 24 satelliitin konstellatio, joka kattaisi maapallon kokonaisuudessaan kolme kertaa päivässä. Mielenkiintoinen mahdollisuus satelliittikartoituksessa ovat myös piensatelliitit, jotka voidaan ohjelmoida kuvaamaan haluttuja alueita (esimerkiksi tuhoutuneita metsäalueita) kustannustehokkaasti.

## Korkeusmalleihin perustuva tuulituhojen tunnistusmenetelmiä

### Perusmenetelmä

Kahden eri ajankohdan latvusmallien erotusmenetelmällä on tunnistettu muun muassa harvennettuja ja tuulituhoutuneita puita sekä puuston kasvua. Epäsuorasti menetelmää on käytetty myös määrittäessä lahopuun määrää. Tällöin maahan kaatuneet lahopuut on mitattu aikavälin alkutilassa ja toista ajankohtaa on hyödynnetty vain kartoittamaan kaatuneet puut. Kahden eri ajankohdan latvusmallin erotusmenetelmää on useimmiten muokattu hieman sovelluskohtaisesti. Seuraavissa kappaleissa esittelemme tarkemmin kaksi pintamallien erotukseen kehitettyä sovellusta.

### Tuulituhot

Mielenkiintoinen vaihtoehto metsätuhoihin liittyvässä muutostulkinnassa on laserkeilauspintamallin ja ilmakuvapintamallin yhdistäminen. Kyseinen vaihtoehto voisi olla kustannustehokkaampaa kuin kahden laserkeilauspintamallin hyödyntäminen, varsinkin jos lähtökohtana voidaan käyttää valtakunnallista Maanmittauslaitoksen (ilmaista) laserkeilausaineistoa. Menetelmällä voidaankin nähdä suuria mahdollisuuksia kehitettäessä sovelluksia operatiiviseen laajojen alueiden lumi- ja tuulituhojen seurantaan.

Menetelmää testattiin käyttäen vuoden 2011 Tapani-myrskyn jälkeen kerättyjä ilmakuvauksaineistoja. Ilmakuvat kerättiin 8.1.2012 juuri ensilumen satamisen jälkeen. Yhden päivän aikana suoritettu kuvaus kattoi 1620 km<sup>2</sup> laajuisen alueen 5,3 km kuvauk korkeudelta tuottaen 0,3 m maastoresoluution. Ilmakuvilta tuotettiin pintamalli 1 piste/m<sup>2</sup> tiheydellä ja sitä verrattiin vuonna 2008 kerättyyn valtakunnalliseen laserkeilausaineistoon ja sen perusteella tuotettuun pintamalliin. Kaikki merkittävät tuulituhalueet, joilla oli enemmän kuin 10 kaatunutta puuta/ha, pystyttiin havaitsemaan automaattisesti pintamallien erotusmenetelmällä.

## Lumituhot

Lumituhot muistuttavat monelta osin tuulituhoja: lumi kaataa yksittäisiä puita, puuryhmiä tai katkoo puiden latvoja. Verrattuna tuulituhoihin, lumi tuhoaa kuitenkin enemmän vain yksittäisiä puita, eivätkä tuhot ole aina niin laaja-alaisia. Lumen katkoessa puiden latvuksia, on tärkeää pystyä erottamaan siis myös tuhot, joissa koko puu ei ole kaatunut. Lumituhojen kartoituksessa käytettävien kaukokartoitusaineistojen tulee olla erotuskyvyltään sellaisia, joista pystyy erottamaan yksittäisiä puita tai vain muutamien neliömetrien kokoisia tuhoalueita.

Lumituhojen tulkintaan on kehitetty laserkeilauspintamallin erotukseen perustuva muutostulkintamenetelmä ( $\Delta$ CHM-menetelmä). Menetelmällä voidaan tehdä puutason tai ainakin puuryhmätason muutostulkintaa ja se on mahdollinen menetelmä puuston 3D-rakenteessa tapahtuvien muutosten seurantaan ja näin ollen lumituhojen nopeaan ja tarkkaan paikallistamiseen. Käytännön ongelmana on, että useampiaikaista tiheäpulsista laserkeilausaineistoa on oltava saatavilla ja lisäksi lumituhon erottaminen harvennuksesta saattaa olla vaikeaa.

## Tuulituhojen riskianalyysit

Metsikkö- ja ympäristötunnuksia, jotka vaikuttavat lumi- tai tuulituhoriskiin tunnetaan hyvin kirjallisuuden perusteella. Näitä ovat muun muassa puulaji, runkomuoto ja latvuksen koko. Edellä mainittujen menetelmien perusteella tuotetut pintamallit ja monet saatavilla olevat avoimet paikkatietoaineistot (esimerkiksi VMI:n monilähdeinventointitieto) tarjoavat joko suoraan näitä tunnuksia tai sitten tunnuksia, jotka korreloivat vahvasti tuhoriskiin vaikuttavien tunnusten kanssa. Mallinusaineistona pintamallit tarjoavat yksityiskohtaisempaa ja tasalaatuisempaa tietoa esimerkiksi kuvioittaisen arvioinnin tietoihin verrattuna. Lisäksi pintamallit ovat avoimesti saatavilla yli metsänomistusrajojen.

Huittisissa tehtyä tuulituhojen kartoitustutkimusta jatkettiin kehittämällä tuulituhojen alueelliset riskimallit. Tutkimusalueelle sijoitettiin systemaattinen koealaverkko ja koealoilta määritettiin ilmakuvien avulla visuaalisesti oliko koeala kärsinyt tuulituhosta. Tämän jälkeen luotiin logistista regressiota

hyödyntäen riskimallit koealojen tuholuokituksen, laserkeilausmuuttujien sekä puulajitiedon välille. Laserkeilauksen avulla määritetyt tunnuksot, kuten puuston pituus ja tuhoalueen korkeus merenpinnasta sekä pääpuulaji selittivät tilastollisesti merkitsevästi tuulituhon todennäköisyyttä. Muita kirjallisuuden perusteella tuulituhoriskille altistavia tekijöitä, kuten maaston topografiaan liittyvät tunnuksot, kohteen etäisyys aukkoon sekä puiden elinvoimaisuuteen liittyviä tekijöitä (esimerkiksi latvuksen koko) voidaan selvittää laserkeilauksen sekä ilmakuvapintamallin avulla.

## Johtopäätökset

Viime aikoina toteutettujen tutkimusten perusteella voidaan päätellä, että luonnon häiriötekijöiden metsiin aiheuttamia muutoksia, kuten tuuli- ja lumituhoja on mahdollista inventoida useampiaikaisten laserkeilausten tai laserkeilauksen ja ilmakuvapintamallien avulla. Lisäksi yksityiskohtainen 3D-kaukokartoitusaineisto tuo lisäarvoa tuulituholle riskialttiiden alueiden kartoitukseen. Metsänomistajien lisäksi tällaisista menetelmistä voivat hyötyä esimerkiksi sähköyhtiöt. Pintamallien erotusmenetelmän käytännön hyödyntämistä rajoittaa kaikista eniten aineistojen saatavuus eli ajallinen temporaalinen resoluutio. Toisaalta valtakunnallinen laserkeilausaineisto tarjoaa hyvän lähtökohdan moneen muutostulkinta-analyysiin. Toinen ongelma on erottaa puuston kasvu ja metsänhoidolliset toimenpiteet tuhojen aiheuttamista muutoksista, kun aika laserkeilausaineistojen välillä kasvaa.

Tässä artikkelissa esitellyt laserkeilaus-, ilmakuva- sekä sateelliittikuvapintamallit kuvaavat maanpinnan korkeuden ja latvuston rakenteen vaihtelua. Monet näistä tunnuksista korreloivat vahvasti tuuli- tai lumituhoriskien kanssa. Pintamallit tarjoavat siis uudenlaisen mahdollisuuden entistä tarkempaan tuhoriskin mallintamiseen ja kartoitukseen.

## Kirjallisuutta

Honkavaara, E., Litkey, P. & Nurminen, K. 2013. Automatic storm damage detection in forests using high-altitude photogrammetric imagery. Remote Sensing

5: 1405–1424.

Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyypä, J. & Honkavaara, E. 2013. Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 83: 104–115.

Vastaranta, M., Wulder, M.A., White, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing* 39(05): 382–395.

Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, A., Hovi, A. & Holopainen, M. 2012. Mapping of snow-damaged trees in bi-temporal airborne LiDAR data. *European Journal of Forest Research* 131: 1217–1228. doi: 10.1007/s10342-011-0593-2.

White, J.C., Wulder, M.A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Pitt, D. & Woods, M. 2013. The utility of image-based point clouds for forest inventory: a comparison with airborne laser scanning. *Forests* 4(3): 518–536.

■ Mikko Vastaranta, Ninni Saarinen & Markus Holopainen, Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos;  
Eija Honkavaara & Juha Hyypä, MML:n paikkatietokeskus  
Sähköposti mikko.vastaranta@helsinki.fi