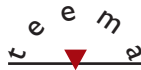


Juha Hyyppä, Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa, Markus Holopainen,
Paula Litkey, Hannu Hyyppä ja Sanna Kaasalainen

Lasermittauksiin perustuva biomassamuutosten ja metsätuhojen seuranta



Johdanto

Kaukokartoitus on tehokas väline metsässä tapahtuvien muutosten, esimerkiksi hakkuiden tai metsäpinta-alan seurantaan. Ilmastonmuutoksen myötä keskeiseksi aiheeksi on nousemassa metsiköiden kokonaisbiomassassa tapahtuva muutos, johon vaikuttavat puuston kasvu, hakkuut sekä metsätuhojen ja puiden luontaisen kuoleamisen aiheuttama poistuma. Lasermittauksilla voidaan seurata metsiköissä ja jopa yksittäisissä puissa tapahtuvia muutoksia. L-Impact-hankkeen puitteissa on tehty ensimmäisiä tutkimuksia yksityiskohtaisen kaukokartoituksen hyödyntämisestä puutason muutostulkinnessa. Tässä kirjoituksessa esitetään kyseisiin tutkimuksiin perustuva katsaus lasermittausten käytönmahdollisuuksiin puuston biomassamuutosten ja metsätuhojen seurannassa.

Metsätuhojen seuranta

On ennustettu, että ilmastonmuutos nostaa Suomen vuotuista keskilämpötilaa 4–5°C talvisin ja 2–3°C kesäisin seuraavan sadan vuoden aikana. Kohoava lämpötila edistää esimerkiksi metsätuhoja aiheuttavien häiriötekijöiden runsastumista. Metsien tuhonaiheuttajien esiintymistiheys, tuhojen kesto ja pinta-ala tulevat lisääntymään. Useat erityyppiset tuhot myös kytkeytyvät toisiinsa. Myrskyt ja kui-

vuus johtavat usein hyönteistuhoihin, joiden jälkeen myös metsäpalojen riski kasvaa.

Suomessa, kuten muissakin Euroopan maissa, etenkin bioottisten syiden aiheuttamien metsätuhojen seuranta ja inventointi perustuu suurimmaksi osaksi maastossa tehtäviin havaintoihin, näytteiden keräämiseen ja laboratoriokasvatuksiin, mikä on erittäin työvoimavaltaista, resurssveja vievää ja hidasta työtä. Virhemarginaali on myös suuri. Valtakunnan metsien inventointi (VMI) tuottaa myös tietoa metsän terveyteen vaikuttavista tekijöistä, mutta koelaverkoston tai otantaa ei ole suunniteltu metsätuhojen inventoinnin kannalta. Metsätuhojen inventoinnin täytyisi perustua kattavaan, säännöllisesti ja riittävän usein toistuvaan sekä luotettavaan havainnointiin, jossa mittakaava on tarkoituksenmukainen. Inventoinnin täytyisi myös tuottaa riittävän varhaisessa vaiheessa tietoa malleja ja riskiennusteita varten.

Laserkeilaus muutosten seurannassa

Ilmasta käsin tehtävä laserkeilaus on käyttökelpoinen kartoitettaessa latvuserroksen tiheyttä. Sen avulla voitaneen havaita myös hyönteisten aiheuttaman lehvästökadon tilapäiset muutokset. Latvuksen aukkoisuus ja lehtialaindeksi vaikuttavat voimakkaasti laserpulssin läpäisevyyteen lehvästön halki. Laserpulssien tiheys, tyypillisesti 0,5–10 pulssia/m², mahdollistaa pulssin kulkemisen osin latvuksen

halki. Laserkeilauksen avulla voidaan tuottaa esim. karttoja lehtialan ja metsän terveyden muutoksista. Kartat antavat tietoa tuholaisien aiheuttaman ajallisen ja alueellisen muutoksen suunnasta ja voimakkuudesta tarkasteltavalla alueella.

Teknisesti laserkeilaukseen perustuva metsätuhojen ja biomassamuutosten seuranta perustuu kahden eri ajankohdan mittausten perusteella tehtyyn muutostulkintaan. Yhden ajankohdan kaukokartoitusmittauksia ei voida luotettavasti käyttää metsätuhojen määrittämiseen, ellei löydetä kaukokartoitusaineistosta selkeää piirrettä, joka kuvaa vain tuhoa (esim. sävyarvoa). Muutosten analysoinnissa yleisimmin käytetään laserin pistepilvestä tai takaisinsironneesta intensiteetistä johdettavia suureita, kuten puuston pituusmallia, latvamallia, kvantiileja, keskipituutta ja kalibroitua intensiteettiä tai niiden avulla arvioituja puustotunnuksia molemmille ajankohdille. Oletuksena on, että havaittu muutos kuvaa tutkittavaa muutosta, joka joudutaan yleensä kalibroimaan maastomittausten avulla. Muutos voi myös olla useamman tekijän yhteisvaikutus.

Maalasermittaukset puiden biomassamuutosten ja harsuuntumisen mittaamisessa

Silmävaraisesti tehtävät harsuuntumismittaukset ovat hyvin subjektiivisia, minkä vuoksi kaukokartoitusmenetelmien käytöllä voitaisiin päästä parempaan luotettavuuteen harsuuntumisen mittaamisessa. Pulliainen ym. havaitsivat jo 1990-luvun alkupuolella, että kaukokartoituslaitteilla, kuten mikroaaltoradiometrillä, voidaan tuottaa hyvinkin tarkkaa muutostietoa puuston neulaskadosta, jos mittaukset tehdään taivasta kohden. Mikroaaltoradiometrillä tehtiinkin aikasarjamittaus yksittäiselle kuuselle, josta mittausten välillä poistettiin neulasia mekaanisesti. Mikroradiometrin mittaustulos (kirkkauslämpötila) korreloi lähes täydellisesti puun neulasmassamuutoksen kanssa. Samalla ajatuksella Geodeettinen laitos ja Helsingin yliopisto toteuttivat harsuuntumis- ja biomassamuutosmittauksen männylle käyttämällä maalaserkeilainta mittalaitteena. Poistetut neulaset punnittiin 2 gramman tarkkuudella. Maalaserkeilain tuotti puusta pistepilven. Piste-

pilvestä laskettiin aluksi erilaisia tilavuusmalleja, joille tehtiin muutostulkinta. Tehdyt muutostulkinnat kuvasivat selkeästi, mitkä kohdat latvuksista olivat harsuuntuneet ja kustakin tilavuusalkiosta suhteellisesti vähentynyt pistemäärä antoi arvion harsuuntuneisuusasteesta. Tällä analyysillä saatiin vain puun uloimman kerroksen muutokset analysoitua. Puun kokonaisbiomassamuutos voitiin kuitenkin arvioida pistepilvestä laskettujen piirteiden avulla. Ensimmäisessä kokeessa puusta sironneiden laserpisteiden lukumäärän muutos korreloi lähes täydellisesti ($R^2=0,99$) puuston kokonaisbiomassamuutoksen kanssa lineaarisella mallilla.

Jatkotutkimuksessa sama koe toistettiin viidelle männylle ja viidelle kuuselle. Laserkeilain asennettiin katsomaan puita sekä ylä- että alaviistoon. Harsuuntuminen ja biomassamuutos toteutettiin mekaanisesti viidessä vaiheessa. Tutkimus osoitti, että puuston suhteellinen kokonaisbiomassamuutos voitiin selittää puusta takaisinsironneella laserpisteiden lukumäärän muutoksella lineaarisen mallin avulla 0,92 selityksasteella ja epälinearisella mallilla yli 0,95 selityksasteella. Neulasten ja oksien suhteellinen biomassa voitiin määrittää lineaarisella mallilla 0,97 selityksasteella. Mäntyjen ja kuusien tuloksissa ei ollut eroja. Sekä alaviistoon että yläviistoon tehdyt keilaukset tuottivat samanlaiset päätelmät.

Tutkimukset osoittivat, että ainakin pienillä puilla laboratorio-olosuhteissa maalaserkeilaimen puusta tuottama pistemäärä korreloi voimakkaasti puun ja oksien sekä neulasten biomassan kanssa. Harsuuntuminen ja vastaava biomassamuutos voitiin määrittää hyvin tarkasti. On hyvin todennäköistä, että samansuuntaiset tulokset saadaan jatkossa määritettyä myös suurempien puiden biomassamuutoksille. Suurien puiden ongelmana on runkojen dominoiva vaikutus pistemääriin sekä alhaalta ylös keilattaessa pistepilven selkeä harveneminen jo yli 20 metrin etäisyyksillä. Koska maalaserkeilauksessa pistetiheys (pulsseja per pinta-ala) pienenee verrannollisena etäisyyden neliöön, on odotettavissa, että pienten neulasmäärien muutoksia ei välttämättä saada selville yksittäisen puun tasolla. Tällä hetkellä Geodeettinen laitos ja Helsingin yliopisto tekevät tutkimuksia näiden johtopäätösten varmentamiseksi sekä Ilomantsin Palokankaan että Outokummun alueilla, joissa molemmilla on hyönteistuhosta johtuva biomassamuutos havaittavissa.

Ilmalaserkeilaus metsätuhojen ja biomassamuutosten mittaamisessa

Metsätuhojen havaitseminen ilmasta tehdyillä laserkeilauksilla on perustunut tähän asti yleensä lehtialaindeksiin (LAI, Leaf Area Index) määrittämiseen laserkeilausaineistosta. Tyypillisesti lehtialaindeksiä kuvaavana piirteenä on käytetty kaikujen kokonaismäärän ja latvustoalueen alapuolelle osuneiden kaikujen määrän suhdetta. Tällä tavalla määritettyjen lehtialaindeksien arvojen ja maastossa LAI-mittarilla mitattujen arvojen välille on raportoitu selitysaste 0,9. Metsätuhon näkyvyyttä ilmalaseraineistossa on myös mitattu Norjassa suorittamalla kolme eriaikaista lentoa, joilla tuholaiskohteessa havaittiin mittausten välillä muutoksia lehtialaindeksissä. Esimerkiksi mäntymetsäalueella mitattiin touko-, heinä- ja elokuussa lehtialaindeksit 0,93, 0,83 ja 0,85. Tuloksia on perusteltu siten, että alkukaudesta (toukokuu) on saatu korkein arvo ennen hyönteisten aiheuttamaa neulastuhhoa (heinäkuu), josta arvot hieman nousivat luonnollisen kasvun myötä ja toukkien jo koteloiduttua (elokuu). Yhdestä keilauksesta tapahtuvaa metsän terveyden arviointia varten on esitetty käytettäväksi indikaattoria, joka on laserkeilausaineistosta mitatun lehtialaindeksin ja metsän puustotiheyden suhde.

Yksinkertainen tapa mitata puuston biomassamuutoksia on määrittää latvusmallien pintojen erotus, joka osin kuvaa puuston pituuskasvua ja osin leveyskasvua. Myös yksinpuintulkinnalla voidaan määrittää yksittäisen puun biomassaa tai runkotilavuus ja kahtena eri ajankohtana arvioitujen biomassojen ja runkotilavuuksien erona muutos. Koska Suomessa latvustot saattavat olla hyvinkin kapeita ja mittausteoriassa on aina hiukan erilainen, voi yksittäisten puiden mittaustulosten vertaaminen eri lentojen välillä olla vaikeata. Siksi edellä esitetty laboratoriokokeisiin perustuva päätelmä, että puustosta tulevien kaikujen määrä korreloi voimakkaasti biomassan muutoksiin, vaatii käytännön jatkotutkimuksia. Yksinkertaisimmillaan biomassamuutokset voitaisiin määrittää laskemalla kahden eri ajankohdan samanlaisella laitteistolla ja lentoparametreilla keilattujen pistepilvien pistemäärien suhteellisenä erona. Jos tämä voidaan lentomittauksilla todeta, laserkeilaus tuottaisi puun pituuden, latvusleveyden

ja puulajin lisäksi tarkkaa tietoa myös biomassasta. Tätä tietoa voitaisiin hyödyntää merkittävästi käytännön metsien inventoinnissa.

Laserintensiiteetin käyttö muutosten seurannassa

Laserkeilauksessa takaisinsironneen signaalin voimakkuutta eli intensiteettiä on käytetty metsäntutkimuksessa tehostamaan automaattisia kohteen tunnistus- ja luokittelumenetelmiä pistepilvistä. Näitä menetelmiä käytetään esim. lehtialaindeksin määrittämiseen, puulajin tai latvuston muodon tunnistamiseen. Intensiiteettiaineistosta voidaan tässä yhteydessä analysoida mm. vastaanotettujen pulssivoimakkuuksien suhteita, joista saadaan arvioitua esim. kasvuston suhteellista osuutta. Yhdistämällä intensiteettiaineistoa pistepilveen voidaan myös tarkemmin arvioida biomassan määrää tai eri puulajien suhteellisia osuuksia esim. havumetsissä tai erottaa maastomallia varten maapisteet kasvuston pisteistä.

Intensiiteettiaineiston sujuva käyttö edellyttää kuitenkin, että intensiteetti on suhteellisesti kalibroitu. Tämä edellyttää mm. etäisyydestä johtuvien korjausten tekemistä aineistolla. Intensiiteettiaineiston käyttöä heikentää se, että keilat osuvat kullakin keilauskerralla hieman eri tavoin ja eri kohtaan latvustoa.

Päätelmät

Tähänastisten tutkimustulosten valossa laserkeilaus on tarkka väline puiden biomassan mittaukseen. Näin ollen on todennäköistä, että laserkeilaus tulee jatkossa olemaan tärkeä menetelmä niin metsätuhojen kuin muidenkin tekijöiden aiheuttamien biomassamuutosten seurannassa. Jo nyt biomassamuutosten tulkintaa voidaan tehdä maalaserkeilauksella. Parempi tietämys ilmasta tapahtuvan laserkeilauksen ja metsän eri osien vuorovaikutuksesta tulee lähivuosina antamaan lisätietoa ilmakeilauksen suorasta hyödyntämisestä metsätuhojen ja muiden biomassamuutosten kartoituksessa. Alustavat tulokset ovat kuitenkin lupaavia. Jos Suomen kattava ilmalaser-

keilaus tullaan jatkossa toistamaan osana kuvioit- taista metsien inventointia (2020-luvulla), voidaan koko Suomen kattavia metsien biomassamuutoksia jatkossa analysoida ja raportoida entistä tarkemmin ja hyvinkin yksinkertaisin menetelmin.

Kirjallisuutta

- Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannican, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J. & Wotton, B. M. 2001. Climate change and forest disturbances. *Bioscience* 51: 723–734.
- Lyytikäinen-Saarenmaa, P. & Tomppo, E. 2002. Impact of sawfly defoliation on growth of Scots pine *Pinus sylvestris* (Pinaceae) and associated economic losses. *Bulletin of Entomological Research* 92: 137–140.
- Pullianen, J., Hallikainen, M., Hyypä, J., & Heiska, K. 1992. Laboratory and tower based microwave measurements of spruce defoliation. *Proceedings of IGARSS'92 Conference, Houston Texas*, 26–29 tou- kokuuta 1992, s. 1177–1180.
- Solberg, S., Næsset, E., Holt Hanssen, K. & Christiansen, E. 2006. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 102: 364–376.
- Solberg, S., Brunner, A., Holt Hansen, K., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M., Stenberg, P., 2009. Map- ping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 113: 2317–2327.

■ Prof. Juha Hyypä, dos. Sanna Kaasalainen, TkL Paula Lit- key, Geodeettinen laitos; dos. Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa, Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos; dos. Markus Ho- lopainen, Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos; dos. Hannu Hyypä, TKK, Rakennetun ympäristön mitta- uksen ja mallinnuksen instituutti.
Sähköposti juha.hyypa@fgi.fi