



Topi Tanhuanpää^{1,2}, Tuomas Yrttimaa³, Einari Heinaro² ja Markus Holopainen²

Laserkeilaus maalahopuun määrän ja ominaisuuksien kartoituksessa

Tanhuanpää T., Yrttimaa T., Heinaro E., Holopainen M. (2022). Laserkeilaus maalahopuun määrän ja ominaisuuksien kartoituksessa. Metsätieteen aikakauskirja 2022-10684. Tieteen tori. 9 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10684>

Yhteystiedot ¹Itä-Suomen yliopisto, Historia-, ja maantieteiden laitos, Joensuu; ²Helsingin yliopisto, Metsätieteiden osasto, Helsinki; ³Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto, Joensuu
Sähköposti topi.tanhuanpaa@helsinki.fi

Hyväksytty 25.1.2022

Johdanto

Kuolleen puun määrä on keskeinen osa metsäluonnon ekologiaa. Lahopuumäärän väheneminen on todettu keskeiseksi uhanalaisuuskehityksen syyksi 30 %:lla metsiemme uhanalaisista lajeista. Lahopuuhun erikoistuneiden lajien lisäksi lahopuulla on merkittävä rooli myös hiilen varastoinnissa. Järeä kuollut puuainehajoaa verrattain hitaasti ja vaikuttaa näin metsiin sitoutuneen hiilen määrään jopa kymmeniä vuosia. Runsalahopuustoisilla kohteilla kuolleen puuston vaikutus hiiliasapainoon voikin olla huomattava. Lahopuun määrän lisäksi myös sen laatu on keskeinen metsäluonnon ekologiaan ja monimuotoisuuteen vaikuttava tekijä. Lahopuuringon järeys on helposti mitattava laatutunnus, joka kielii puuaineen ominaisuuksista lahopuulajien kasvualustana. Lahopuun ekologinen ja ilmastollinen rooli kannustaakin tutkimaan ja kehittämään lahopuun määrän ja laadun kartoittamista.

Käytännön metsävaratiedot ovat lahopuun osalta vajavaisia. Valtakunnan metsien inventoinnissa kuollut puusto on ollut mitattavien tunnusten joukossa eri muodoissaan VMI9:sta (1996) lähtien. Operatiivisen metsävaratiedon tavoin lahopuutietoakaan ei kuitenkaan voida tuottaa luotettavasti pienalueille pelkän VMI-otannan perusteella. Operatiivisen metsävaratiedon osalta käytetään suurempaa koealamäärää ja yksityiskohtaisempaa kaukokartoitustietoa. Intensiivisten maastomittausten ja lentolaserkeilauksen avulla onkin pystytty kustannustehokkaasti korvaamaan aiemmin käytössä olleet kuvioittaiset maastomittaukset varttuneen elävän puuston osalta. Metsäalueen ekologista tilaa kuvaavat tunnuksien, kuten lahopuun määrä, ovat kuitenkin jääneet käytännössä kokonaan pois tuotettavien ja päivitettävien tunnusten listalta.

Luotettavan lahopuutiedon tuottaminen onkin haastavaa. Lahopuun harvinaisuuden ja satunnaisen esiintymisen vuoksi sen mallintaminen on hankalaa erityisesti talousmetsissä, joissa elävän puuston ominaisuudet selittävät heikosti lahopuun määrää ja laatua. Haasteet ulottuvat myös lahopuun kaukokartoitukseen. Keskimäärin noin 70 % kuolleen puun määrästä on maala-

hopuuta, joka jää usein elävien puiden latvusten ja aluskasvillisuuden peittoon. Kohteen näkyvyys hankaloittaa maalahopuun kartoitusta erityisesti passiivisilla, auringonvaloa hyödyntävillä kaukokartoitusmenetelmillä. Tutkimusryhmämme onkin viime vuosien aikana työskennellyt erilaisten laserkeilaukseen perustuvien lahopuun tunnistus- ja kartoitusmenetelmien parissa. Tässä artikkelissa esittelemme kolme maalahopuun kartoitukseen tähtäävää tutkimustamme sekä niiden tutkimusmenetelmällisiä ja käytännön soveltamiseen liittyviä näkökohtia. Kaikki kolme tutkimusta käsittelevät joko lahopuurunkojen tai lahopuun syntyyn johtaneen ilmiön suoraa tunnistusta.

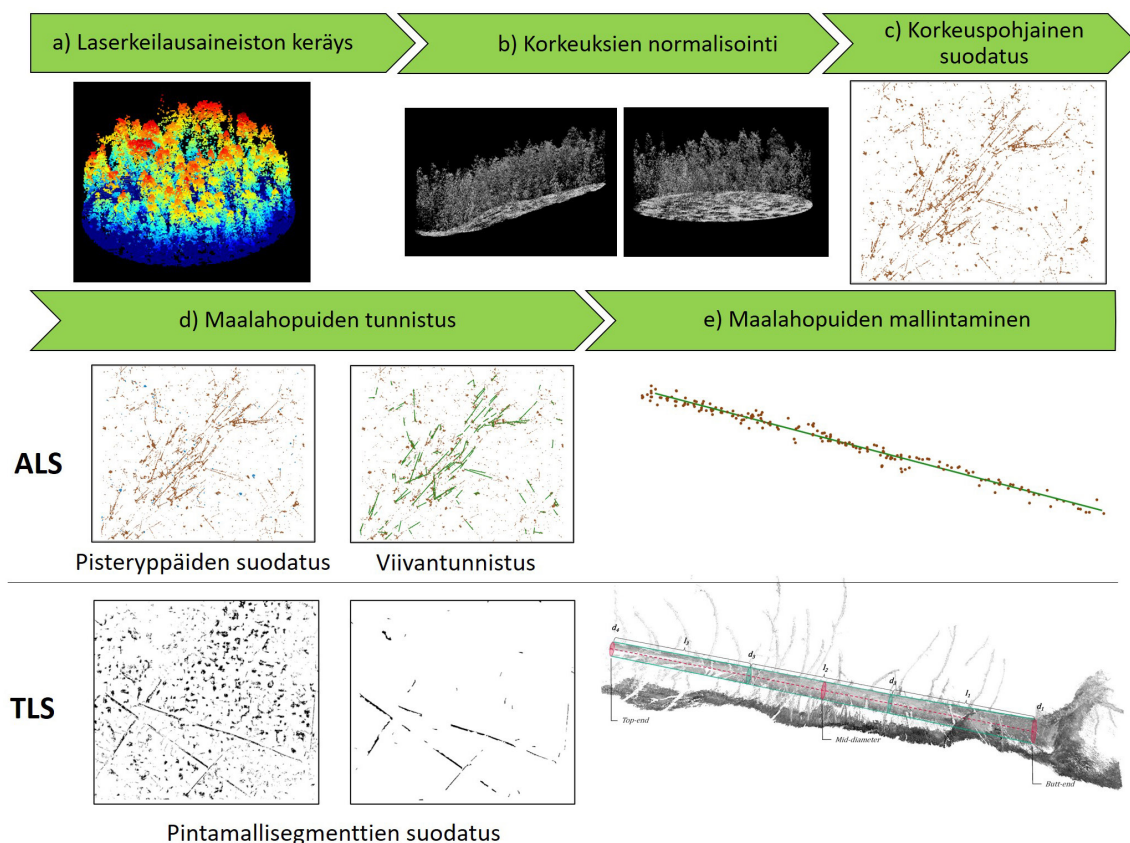
Maalahopuun kartoitus maastolaserkeilauksella

Metsän kolmiulotteista rakennetta voidaan kuvata yksityiskohtaisesti laserkeilaukseen perustuvien lähikartoitusmenetelmien avulla. Maastolaserkeilauksessa kolmijalan päälle asetettu laserkeilain tallentaa ympäröivän metsikkörakenteen digitaaliseen muotoon pistepilveksi. Pistepilviaineiston automaattisten prosessointimenetelmien avulla pistepilvistä voidaan tunnistaa yksittäisiä metsikkörakenteita ja tarkastella niiden ominaisuuksia. Viimeisen parin vuosikymmenen aikana maastolaserkeilauksen on yleisesti havaittu olevan kykenevä ja tehokas menetelmä elävän pystyvuoston kartoitukseen. Samalla maastolaserkeilauksen soveltuvuutta muiden metsikkörakenteiden kuten maalahopuiden kartoitukseen on tutkittu vähemmän.

Hämeenlinnan Evolla toteuttamassamme **tutkimuksessa** kehitimme automaattisen pistepilvi-menetelmän maalahopuiden kartoitukseen maastolaserkeilauksella. Tavoitteena oli lisätä ymmärrystä metsän sisältä kerätyn pistepilven hyödyntämisessä entistä monipuolisemmin metsikkörakenteiden kartoitukseen ja seurantaan. Menetelmä perustuu yksittäisten maalahopuurunkojen tunnistamiseen aluskasvillisuudesta ja maanpinnan muodoista niiden säännöllisten ja sylinterimäisten geometristen muotojen perusteella (Kuva 1). Menetelmällisenä tavoitteena oli tunnistaa yksittäisiä maalahopuurunkoja kuvaavat pintamallisegmentit. Pintamallisegmenteille laskettiin niiden muotoja kuvaavia geometrisia tunnuksia, joiden perusteella ne luokiteltiin maalahopuurunkoja kuvaaviin ja muuta maastoa kuvaaviin segmentteihin. Maalahopuusegmenttien sijainnin ja orientaation perusteella pystyttiin rajaamaan kutakin tunnistettua maalahopuurunkoa kuvaavat pistepilven pisteet, joiden avulla voitiin muodostaa kunkin lahopuurungon läpimitta-, pituus- ja tilavuusestimaatit. Runkojen ominaisuus- ja sijaintitietojen perusteella voitiin edelleen laskea maalahopuun määrää ja laatua koelatasolla kuvaavat tunnuksot sekä koostaa kartta maalahopuun jakautumisesta koelaloille.

Yhteensä 20 metsikkökoelaa ja noin 300 maastossa mitattua maalahopuurunkoa käsittävän koejärjestelyn avulla testasimme kehittämämme menetelmän toimivuutta erilaisissa metsikkörakenteissa ja arvioimme sen hyödyntämisen mahdollisuuksia lahopuuintoiminnissa. Maastolaserkeilaukseen perustuvan automaattisen kartoitusmenetelmän avulla pystyimme tunnistamaan noin kaksi kolmasosaa järeydeltään (läpimitaltaan) vähintään 5 cm olevan maalahopuun tilavuudesta. Maalahopuurunkojen kokonaistilavuuden tunnistusta voitiin parantaa 86 %:iin pistepilven visuaalisella tulkinnalla. Menetelmällisesti merkittävin löydös oli, että yksittäiset maalahopuut voitiin tunnistaa niiden säännöllisten geometristen muotojen perusteella muista maanpinnan muodoista. Maalahopuurunkoja kuvaavat pistepilvisegmentit olivat voimakkaasti elliptisiä, eli niiden pituus oli moninkertainen leveyden suhteen. Pintamallisegmenttien elliptisyyden havaittiinkin olevan tärkein yksittäinen geometrinen tunnus erottamaan maalahopuurungot muista maanpinnan muodoista.

Maastolaserkeilaukseen perustuvan maalahopuun kartoitusmenetelmän avulla saatiin tietoa paitsi maalahopuun määrästä myös sen laadusta tutkittavalla alueella. Kehittämällämme menetelmällä pystyimme ennustamaan maalahopuurungon läpimitan noin 6 cm:n tarkkuudella. Keskimäärin läpimitta yliarvioitiin noin 3 cm, sillä monesti rungot olivat sammalen peittämiä. Lisäksi maastolaserkeilauksen mittausgeometriasta ja maalahopuurunkojen orientaatiosta johtuen



Kuva 1. Maalahopuiden suora tunnistus lentolaserkeilauksen (ALS) ja maastolaserkeilauksen (TLS) avulla. a) Kohteesta kerätään laserkeilausaineisto. b) Pistepilvi normalisoidaan, eli pisteiden z-koordinaatiksi asetetaan korkeus suhteessa maan pintaan. c) Pistepilven tarkastelu rajataan maanpinnan läheisyyteen. d) Pistepilvestä poistetaan runkoihin kuulumattomat pisteryppäät ja maalahopuut tunnistetaan. e) Prosessin tuloksena on malli yksittäisestä lahopuurungosta.

parhaimmassakin tapauksessa vain osa rungon pinnasta saadaan kuvattua. Tämän vuoksi havaittu maalahopuun läpimitan mittaustarkkuus poikkeaa pystypuuston läpimitan noin senttimetriluokan mittaustarkkuudesta.

Tutkimusalueemme kaltaisissa eteläborealisissa metsissä olosuhteet maalahopuun kartoitukseen voivat olla usein haastavat, jos maahan kaatuneiden puiden lahoamisprosessi on edennyt jo pitkälle ja maalahopuurungot makaavat varvikossa sammalten peittäminä muun aluskasvillisuuden seassa. Tutkimuksessamme havaitsimme, että parhaiten kehittämämme menetelmä toimii avoimissa metsiköissä, joissa tunnistettavat maalahopuurungot ovat järeitä ja joissa maastolaserkeilaustekniikka pystyy parhaiten tuottamaan kattavan, koko koealaa kuvaavan pistepilven. On myös syytä huomioida, että pistepilvien keräämisessä käyttämämme mittaasetelma oli alun perin suunniteltu elävän pystypuuston rakenteiden kuvaamiseen. Maalahopuurunkojen spatiaalinen jakautuminen tarkasteltavalle alueelle on usein epätasaista, joten se olisi syytä huomioida jo pistepilviaineistoa kerätessä.

Mitä kattavampi pistepilvi tarkastelun kohteena olevasta metsiköstä kerätään, sitä tarkempia havaintoja metsikön rakenteesta ja erityisesti maalahopuun määrästä ja laadusta voidaan tehdä. Erilaiset mobiililaserkeilaustekniikat, joissa laserkeilain on kiinnitetty joko metsässä maanpinnalla liikkuvaan tai latvuston alla lentävään alustaan, mahdollistavat metsän rakennetta yksityiskohtaisesti kuvaavan pistepilven keräämisen maastolaserkeilausta nopeammin ja soveltunevat siten paremmin myös maalahopuukartoitukseen kokonaisista metsiköistä.

On huomioitava, että kehittämässämme maastolaserkeilaukseen perustuvassa menetelmässä hyödynsimme pelkkää kolmiulotteista rakennetietoa maalahopuun määrän ja laadun kartoitukseen. Jos tarvitaan tietoa maalahopuungon dimensioista riippumattomista tunnuksista kuten lahoasteesta ja puuaineen kosteudesta, kolmiulotteiseen mallinnukseen perustuvan kartoitusmenetelmän rinnalle tarvitaan jokin täydentävä kartoitusmenetelmä.

Maalahopuun kartoitus lentolaserkeilauksella

Lentolaserkeilaukseen perustuva maalahopuun suora tunnistus eli yksittäisten maalahopuiden kartoitus asettaa käytettävälle aineistolle muutamia vaatimuksia. Käytettävän lentolaserkeilausaineiston pistetiheyden on oltava riittävän suuri, jotta maahan kaatuneista puunrungoista saadaan riittävästi havaintoja. Toistaiseksi riittävän tiheitä aineistoja ei ole saatavilla koko maan kattavasti, mutta Maanmittauslaitoksen uuden valtakunnallisen lentolaserkeilauksen pistetiheys on jo melko lähellä vaadittua tiheyttä. Riittävän pistetiheyden saavuttamiseksi metsän pohjalla lentolaserkeilausaineisto on syytä kerätä lehdettömään vuodenaikaan, joko keväällä lumen sulettua tai syksyllä lehtien pudottua. Tällä varmistetaan, että latvusten ja muun kasvillisuuden alle jäävät maalahopuut erottuvat aineistossa mahdollisimman hyvin.

Samoin kuin edellisessä, maastolaserkeilaukseen perustuvassa tutkimuksessa, myös lentolaserkeilausaineistoja hyödyntävässä **maalahopuun suorassa tunnistuksessa** käytettiin hyväksi oletusta lahopuun muodosta. Lentolaserkeilauspistepilvessä maalahopuut muodostavat viivamaisia pistejoukkoja, jotka on mahdollista tunnistaa automaattisesti viivantunnistusalgoritmien, kuten Hough-muunnoksen avulla. Ennen varsinaista maalahopuiden tunnistusta pistepilvestä poistettiin mahdollisimman suuri osa maalahopuihin kuulumattomista pisteistä, sillä etenkin Hough-muunnos on herkkä virhetunnistuksille.

Suurin osa maalahopuihin kuulumattomista pisteistä saatiin poistettua korkeustiedon avulla. Maalahopuut sijaitsevat lähellä maanpintaa, joten laserkeilausaineistosta voidaan poistaa kaikki reilusti maanpinnan yläpuolella sijaitsevat pisteet (Kuva 1c). Tämän mahdollistamiseksi pisteiden korkeus normalisoitiin, eli laskettiin jokaisen pisteen korkeus maanpinnan suhteen (Kuva 1b). Normalisoinnissa käytettiin maanpinnan korkeusmallia, jonka määrittämiseen on olemassa useita kolmiointiin tai rasterisointiin pohjautuvia menetelmiä. Maanpinnan korkeusmallin määrittämisen jälkeen pisteiden korkeus normalisoitiin vähentämällä korkeusmallin korkeus kunkin pisteen alkuperäisestä korkeudesta. Normalisoinnin jälkeen aineistosta poistettiin pisteet, jotka sijaitsivat yli metrin maanpinnan yläpuolella.

Korkealla maanpinnasta sijaitsevien pisteiden lisäksi lentolaserkeilausaineistosta pyrittiin suodattamaan pois mahdollisimman suuri osa niistä maanpinnan lähellä sijaitsevista pisteistä, jotka eivät kuulu maalahopuihin (Kuva 1d). Näiden pisteiden poistamisessa käytettiin hyväksi pisteryppäiden muotoja. Koska maalahopuut ovat viivamaisia kohteita, oletettiin, että pyöreähköt tai epämääräisen muotoiset pisteryppäät eivät ole peräisin maalahopuista, vaan muista maaston kohoumista, ja ne voitiin näin ollen poistaa aineistosta.

Maalahopuihin kuulumattomien pisteiden poistamisen jälkeen tehtiin varsinainen lahopuiden tunnistus viivantunnistusalgoritmien avulla (Kuva 1d). Päädyimme käyttämään viivantunnistuksessa Hough-muunnosta, joka kykenee määrittämään maalahopuungon sijainnin ja asennon harvahkonkin pistepilviaineiston avulla. Hough-muunnos etsii pisteaineistosta samalle suoralle asettuvat pisteet ja määrittää suoran parametrit. Hough-muunnoksen lopputuloksena saatiin aineistossa vahvimmin esillä olevan suoran yhtälö. Maalahopuun sijainnin tunnistamiseksi suora muutettiin janaksi, jonka päätepisteitä ovat maalahopuun tyvi ja latva. Ennen seuraavan suoran tunnistusta, jo tunnistetun suoran pisteet poistettiin aineistosta. Suoran tunnistusta ja

sitä seuraavaa pisteiden poistamista toistettiin, kunnes aineistossa ei ollut enää tunnistettavia lahopuita. Viivantunnistuksen jälkeen maalahopuiden pistepilviesitys muodostettiin tunnistettujen viivojen ympärille (Kuva 1e). Pistepilvestä siis määritettiin näin kaikki lahopuuhun kuuluvat pisteet. Lopullisesta pistepilviesityksestä voidaan estimoida esimerkiksi yksittäisen maalahopuun läpimitta tai tilavuus.

Edellä esitetyllä viivantunnistusprosessilla kyettiin tunnistamaan noin 75 % järeistä, läpimitaltaan yli 30 cm olevista maapuista. Menetelmän suurin etu on sen metsäpinta-alaan suhteutettu tehokkuus, minkä vuoksi se soveltuu laajojen alueiden lahopuukartoitukseen. Merkittävin menetelmään liittyvä haaste liittyy pistepilvien ennakkokäsittelyyn. Mitä heikommin maalahopuihin kuulumattomat laserpisteet onnistutaan poistamaan aineistosta, sitä heikommin viivantunnistus toimii, mikä johtaa ylimääraisten maapuiden tunnistamiseen. Tästä syystä alueet, joilla on runsaasti aluskasvillisuutta tai hakkuutähteitä, ovat menetelmän kannalta haasteellisia. Myös virheet maanpinnan korkeusmallin luokittelussa voivat johtaa puutteellisiin tai virheellisiin maalahopuhavaintoihin.

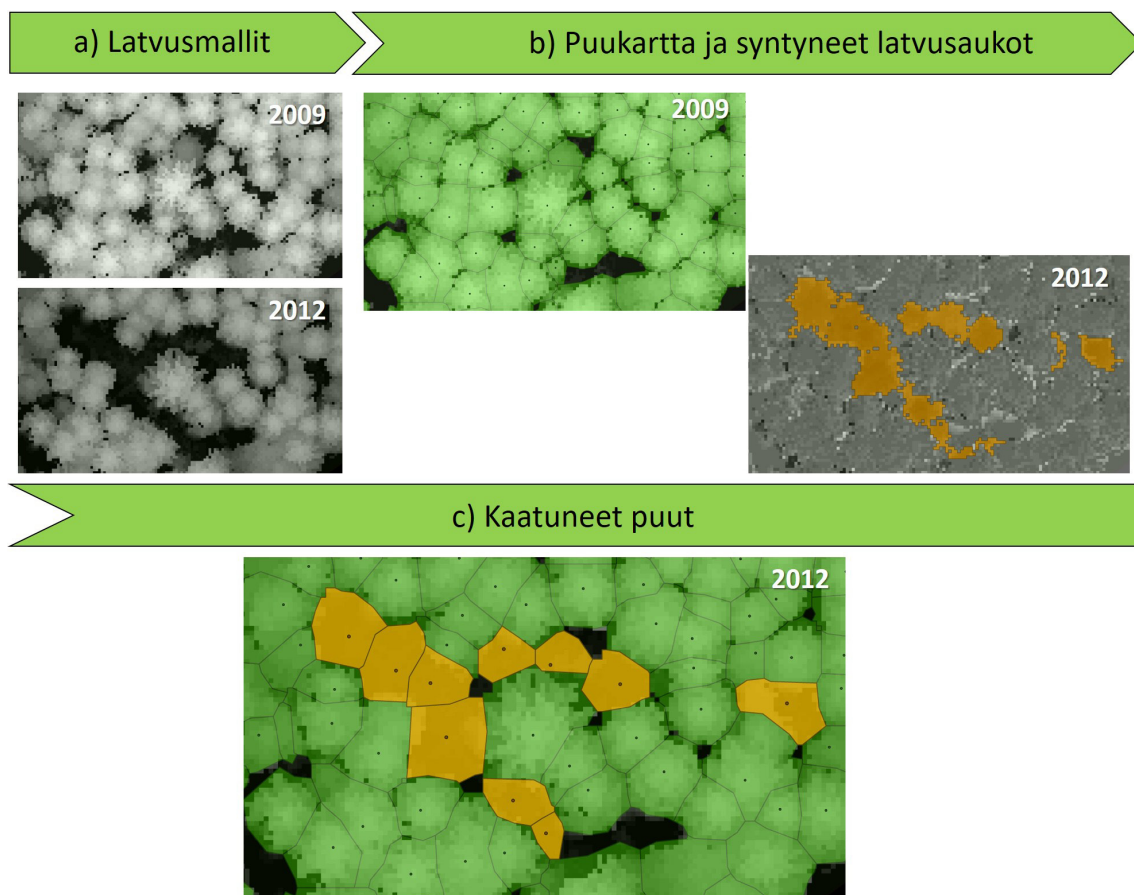
Maalahopuun tunnistaminen muutostulkinnan avulla

Maalahopuun suora tunnistaminen yhden ajankohdan lentolaserkeilausaineiston avulla on siis mahdollista, mutta edellyttää varsin tiheää aineistoa. Lahopuun keskeisten ominaisuuksien, kuten läpimitan määrittäminen sen sijaan edellyttää erittäin tiheiden, mielellään latvuston alta kerättyjen maastolaserkeilausaineistojen käyttöä. Tiheidenkään pistepilvien käyttäminen ei todennäköisesti takaa kaikkien maalahopuun kannalta olennaisten tunnusten, kuten puulajin tai lahoasteen tunnistusta. Laajojen alueiden kattaminen suoraan tunnistamiseen soveltuvalla tiheällä laserkeilausaineistolla on keilausmenetelmien kehittymisestä huolimatta myös edelleen kallista. Maalahopuurunkojen keskeisten tunnusten selvittäminen laajoilla alueilla vaikuttaisikin olevan mielenkiintoinen kohde latvuston muutostulkinnan hyödyntämiselle. Ryhmämme [tutki](#) usean ajankohdan lentolaserkeilaukseen perustuvan muutostulkinnan mahdollisuuksia lahopuukartoituksissa Helsingin Keskuspuistossa.

Tutkimuksessa käytetty menetelmä perustui kahteen, vuosilta 2009 ja 2012 peräisin olevaan puiden korkeutta kuvaavaan latvusmalliin (Kuva 2a), joissa vallitsevan latvuserroksen puut erotuivat yksittäisinä huippuina. Tarkasteltavan ajanjakson alkutilanteesta muodostettiin yksinpuintulkinnan avulla vallitsevan latvuserroksen puita kuvaava puukartta ja tarkasteluajankohtien välillä syntyneet latvusaukot (Kuva 2b). Latvusaukot määritettiin peräkkäisten ajanhetkien latvusmalleja vertaamalla. Kaatuneet puut määritettiin yhdistämällä vuoden 2009 puukartta tarkastelujakson aikana syntyneisiin latvusaukkoihin (Kuva 2c).

Erotustulkinnan avulla arvioitiin myös syntyneen maalahopuun keskeisiä ominaisuuksia. Yksittäisen maalahopuun ominaisuudet arvioitiin tarkastelujakson alkutilanteen perusteella, eli viimeiseltä ajanhetkeltä, jolla puu on ollut pystyssä ja latvusmallista havaittavissa. Osa tunnuksista määritettiin suoraan pistepilvistä, kun taas toiset edellyttivät allometristen mallien käyttöä. Maalahopuun pituus ja tyven sijainti voitiin mitata varsin tarkasti suoraan latvusmallista. Lehdeettömään aikaan kerätty lentolaserkeilausaineisto mahdollisti myös kaatuneiden puiden luokittelun havu- ja lehtipuihin. Ilman täydentävää tietoa puiden kaatumisajankohta pystyttiin määrittämään vain kahden tarkasteluajankohdan väliin, ei yksittäiseen ajanhetkeen.

Edellä kuvattuja, pistepilvistä mitattavissa olevia tunnuksia käytettiin edelleen syöttötietona malleissa, joilla estimoitiin kaatuneiden puiden läpimittaa ja tilavuutta. Tutkimuksessamme käytimme pituuteen perustuvaa mallia puiden läpimittojen estimointiin ja edelleen puulajikohtaisia tilavuusyhtälöitä runkokohtaisten tilavuuksien määrittämiseen.



Kuva 2. Muutostulkintaan perustuva lahopuun kartoitus. Kaatuneet puut paikannettiin kahden ajankohdan latvusmallien avulla. Tarkasteluajanjakson aikana syntyneet latvusaukot osoittavat kaatuneiden puiden sijainnin. Kaatuneiden puiden eli syntyneen maalahopuun ominaisuudet voitiin määrittää tarkastelujakson alkuhetken puukartan perusteella. Varttuneessa yksijaksoisessa metsikössä syntyneistä maalahopuurungoista havaittiin 97,8 %.

Kahden ajankohdan tiheään lentolaserkeilausaineistoon perustuneessa tutkimuksessa pystyttiin paikantamaan lähes 98 % kolmen vuoden tutkimusajanjaksolla kaatuneista puista. Koalueen järeä, yhdessä latvuserroksessa kasvava kuusivaltainen puusto oli menetelmän toiminnan kannalta lähes optimaalinen, sillä yksinpuintulkinnan onnistuminen on menetelmän kannalta tärkeää. Onkin todennäköistä, että menetelmän soveltaminen lehtipuuvaltaiselle kohteelle heikentäisi tuloksia, sillä lehtipuiden latvusten rajaaminen pistepilvistä on tavallisesti havupuita epävarmempaa. Puulajitulkinnan osalta erotteilu havu- ja lehtipuiden välillä onnistui 89 %:n tarkkuudella. Kaatuneiden runkojen läpimitan ennustustarkkuus todettiin tutkimuksessa riittäväksi maalahopuun läpimittaluokkien tarkasteluun.

Myös erotustulkintaan perustuvan menetelmän käytännön soveltamiseen liittyy haasteita. Järeä lahopuu säilyy metsän pohjalla olosuhteista riippuen kymmeniä vuosia. Näin ollen käytettävän latvusmalliaikasarjan tulisi pystyä katsomaan ajassa taaksepäin hetkeen, jolloin vanhimmat metsän pohjalla erottuvat lahopuut vielä elivät. Tätä taustaa vasten saatavilla olevan lentolaserkeilausaineiston ajallinen kattavuus on vielä riittämätön. Ryhmämme tutkiikin parhaillaan mahdollisuutta käyttää historiallisia ilmakuvia erotustulkinnassa käytettävien pintamallien tuottamisessa. Toinen merkittävä kysymys käytännön hyödyntämisen kannalta on, miten latvuston luonnolliset muutokset, kuten tuulen kaatamat puut erotetaan ihmistoiminnan aiheuttamista muutoksista, kuten hakkuista. Kysymys on keskeinen, sillä latvustossa havaittu muutos ei yleensä merkitse lahopuun lisäänty-

mistä. Maisematason tulkinnaissa tulisikin selvittää, millä tarkkuudella esimerkiksi harvennushakkuut voidaan erottaa luonnonprosesseista. Operatiivisessa toiminnassa tunnistamisessa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi metsänkäyttöilmoituksia.

Muutostulkinnan avulla määritettävät puutason lahoppuestimatit mahdollistavat lahoppudynamiikan yksityiskohtaisen tarkastelun. Kuviotasolla syntyneen lahoppuun määrää ja ominaisuuksia voidaan arvioida yksittäisistä kaatuneista puista johdetuilla summatunnuksilla. Tällaisia ovat esimerkiksi maalahoppuun kokonaistilavuus ja tilavuuden jakautuminen puulajin, läpimitan ja iän muodostamiin ositteisiin. Puukohtainen tieto on myös mahdollista yhdistää puuaineen lahoamis- malleihin. Näin muodostettavat lahoppuun puulaji-, järeys- ja lahoastejakaumaa kuvaavat profiilit olisivat erinomainen työkalu maisematason lahoppuujatkumon tarkasteluun. Tällainen tieto mahdollistaisi entistä tarkemman elinympäristöjen huomioimisen kaikessa metsien käytön suunnittelussa.

Menetelmien haasteet ja soveltaminen

Kolmessa tutkimuksessa tarkastelimme erityyppisiä menetelmiä maalahoppuun tunnistamiseksi. Lahoppurunkojen suoraan tunnistukseen tähtäävät menetelmät perustuivat tiheiden laserkeilauspistepilvien käyttöön hahmontunnistuksessa, kun taas kolmannessa, epäsuoran tunnistuksen menetelmässä hyödynnettiin kahden ajanhetken välillä latvustossa tapahtuneita muutoksia. Kaikki kolme menetelmää osoittautuivat käyttökelpoisiksi, vaikka ongelmakohtiakin tunnistettiin (Taulukko 1). Yksittäisten lahoppurunkojen löytymis- ja mittaamistarkkuudet jäivätkin elävän puuston tunnuksia heikommiksi.

Vaikka tarkkuus runkojen tasolla jääkin jälkeen metsien inventoinnissa totutuista elävää puustoa koskevista tarkkuuksista, maalahoppuun kuviotason kartoituksen osalta tieto on verrattain tarkkaa. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että lahoppuun mallintaminen elävän latvuston ominaisuuksien perusteella on ongelmallista. Varma tieto maalahoppuun sijainnista, ominaisuuksista ja määrästä voidaan saavuttaa ainoastaan suorien mittausten avulla. Laserkeilausmenetelmät antavat tähän mahdollisuuden, jota käytännön olosuhteet rajoittavat. Puiden koko ja

Taulukko 1. Laserkeilaukseen perustuvien maalahoppuun kartoitusmenetelmien liittyvät mahdollisuudet ja rajoitteet.

Maalahoppurunkojen suoraan tunnistukseen perustuva maalahoppuun kartoitus		Muutostulkintaan perustuva maalahoppuun kartoitus
Maastolaserkeilaus	Lentolaserkeilaus	
Mahdollisuudet		
<ul style="list-style-type: none"> Yksityiskohtaista tietoa maalahoppurunkojen dimensioihin liittyvistä laatuunnuksista. 	<ul style="list-style-type: none"> Soveltuu laajojen alueiden kartoitukseen. Luotettava menetelmä järeiden maalahoppuiden kartoittamiseen avoimista metsiköistä. 	<ul style="list-style-type: none"> Soveltuu laajojen alueiden kartoitukseen. Tehokas menetelmä luonnontilaisissa metsissä, joissa latvusaukko tarkoittaa kaatunutta puuta.
<ul style="list-style-type: none"> Kartoitustiedon tuottaminen on nopeaa, sillä se perustuu pistepilvien automaattiseen prosessointiin. 		
Rajoitteet		
<ul style="list-style-type: none"> Soveltuu vain pienten alueiden kartoitukseen. Mittausgeometria epäedullinen lähellä maanpintaa sijaitseville kohteille. 	<ul style="list-style-type: none"> Luotettava kartoitus vaatii riittävän tiheän pistepilviaineiston, jonka spatiaalinen kattavuus vielä rajoittava tekijä. 	<ul style="list-style-type: none"> Koko maalahoppumäärän kartoitus vaatii pistepilviaineiston ajallisen kattavuuden kymmenien vuosien ajalta.
<ul style="list-style-type: none"> Kartoituksen luotettavuus on riippuvainen menetelmien kyvystä tunnistaa yksittäiset maalahoppuut tai niiden maahan kaatumisen seurauksena muodostuneet latvusaukot. Metsän rakenne ja/tai aluskasvillisuus vaikuttavat maalahoppuiden kartoituksen tarkkuuteen. 		

kasvuympäristö vaikuttavat kaikkien kolmen menetelmän tarkkuuteen. Maastolaserkeilaukseen ja lentolaserkeilaukseen perustuvissa menetelmissä runsas aluskasvillisuus ja muut maanpinnan näkyvyyteen vaikuttavat tekijät heikentävät sekä maalahopuiden havaitsemista että niiden keskeisten ominaisuuksien määrittämistä. Rungon pinnan saavuttavien laserpulssien tiheys vaikuttaa etenkin läpimitan mittaamisen tarkkuuteen. Lahopuurunkojen läpimitta vaikuttaa havainnointitarkkuuteen etenkin lentolaserkeilaukseen perustuvassa menetelmässä. Pieniläpimittaisen puuston automaattinen tunnistaminen pistepilvistä on haastavaa ja edellyttää yksityiskohtaisempaa aineistoa kuin suuriläpimittaisen runkojen tunnistaminen. Muutostulkintaan perustuvassa menetelmässä voidaan hyödyntää olemassa olevia allometrisia malleja maalahopuun ominaisuuksien estimointiin. Tämä mahdollistaa harvemman laserkeilausaineiston käytön, sillä tarve kaatuneiden runkojen kolmiulotteiselle mallintamiselle poistuu. Toisaalta menetelmä ei esitetyssä muodossaan ota kantaa, onko latvuksessa havaittu muutos seurausta luonnonhäiriöstä vai metsässä tapahtuneista hakkuista.

Koska sekä mittausympäristö että mitattavien runkojen koko vaikuttavat maalahopuiden havainnointiin ja puutason tunnusten estimointiin, menetelmillä ei voida tuottaa harhattomia laajojen alueiden lahopuuestimaatteja. Sen sijaan menetelmillä voidaan tuottaa metsänkäytön suunnittelussa käytettävää kuviotason lahopuutietoa, joka auttaa määrittämään kohteiden ekologista laatua ja erityispiirteitä. Metsän sisältä laserkeilaamalla tuotetut pistepilvet mahdollistavat yksittäisten metsikkörakenteiden yksityiskohtaisen tarkastelun metsikkörakenteita vahingoittamatta ja tuovat siten lisäarvoa esimerkiksi koealamittauksiin. Laajojen alueiden kartoitukseen soveltuvat lentolaserkeilaukseen perustuvat menetelmät mahdollistavat järeän maalahopuun ja lahopuukeskittymien kartoittamisen. Lahopuurunkojen suora tunnistaminen tutkimuksemme osoittamalla tarkkuudella edellyttäisi todennäköisesti hieman nykyistä tiheämpää lentolaserkeilausaineistoa, mutta muutostulkintaan perustuva lahopuukartoitus olisi toteutettavissa operatiivisesti jo nykyisillä lentolaserkeilauksessa käytettävillä pistetiheyksillä (5 pistettä neliömetrille). Muutostulkinnan kannalta olennaisen latvusmalliaikasarjan muodostaminen vaatisi kuitenkin ilmakehä-aineistojen yhdistämistä tulkintaan. Tällä hetkellä tutkimmekin Maanmittauslaitoksen jopa 1930-luvulle yltävien ilmakehä-arkistojen hyödyntämistä latvusmalliaikasarjojen muodostamisessa. Tarkoituksemme on hyödyntää pitkiä aikasarjoja kertyneen maalahopuun määrän ja kaatuneiden runkojen ominaisuuksien määrittämiseen.

Tutkimustemme tulosten perusteella laserkeilaukseen ja muutostulkintaan perustuvilla menetelmillä voidaan tuottaa käyttökelpoista lahopuutietoa. Käytettävästä menetelmästä riippumatta kartoitettujen lahopuurunkojen läpimitan ja tilavuuden tarkkuus ovat luultavasti elävää puus- toa heikommat. Keskeinen kysymys kuuluukin, mihin tarkoitukseen tietoa kerätään. Operatiivisten metsänkäsittelytoimenpiteiden ohjaamisessa jo tieto merkittävien lahopuukeskittymien sijainnista olisi suuri parannus nykyiseen tilanteeseen, sillä tärkeiden luontokohteiden määrittelyssä kohteiden suhteellinen luokittelu on absoluuttisia tilavuuksia tärkeämpää. Tällaisen tiedon tuottaminen laserkeilauksen avulla on mahdollista, mutta sen operatiivinen toteuttaminen vaatii lisätutkimusta.

Rahoitus

Hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionin LIFE-ohjelmasta. Aineiston sisältö heijastelee sen tekijöiden näkemyksiä, eikä Euroopan komissio tai CINEA ole vastuussa aineiston sisältämien tietojen käytöstä.

Lähteitä

- Heinara E, Tanhuanpää T, Yrttimaa T, Holopainen M, Vastaranta M (2021) Airborne laser scanning reveals large tree trunks on forest floor. *For Ecol Manage* 491, article id 119225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119225>.
- Tanhuanpää T, Kankare V, Vastaranta M, Saarinen N, Holopainen M (2015) Monitoring downed coarse woody debris through appearance of canopy gaps in urban boreal forests with bitemporal ALS data. *Urban For Urban Gree* 14: 835–843. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.08.005>.
- Yrttimaa T, Saarinen N, Luoma V, Tanhuanpää T, Kankare V, Liang X, Hyyppä J, Holopainen M, Vastaranta M (2019) Detecting and characterizing downed dead wood using terrestrial laser scanning. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 151: 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.007>.