

Puuston laatutunnusten mittaus ja mallinnus (MMM-laatu)

Loppuraportti

Helsingin yliopisto, HY (Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, Jiri Pyörälä)
Maanmittauslaitoksen paikkatietokeskus, FGI (Juha Hyyppä)
Itä-Suomen yliopisto, UEF (Matti Maltamo, Tomi Karjalainen)
Luonnonvarakeskus, LUKE (Jaakko Repola, Jari Vauhkonen & Harri Mäkinen)
Metsäteho (Jarmo Hämäläinen, Tapio Räsänen)
Arbonaut (Jussi Peuhkurinen)

Tausta ja tavoitteet

Metsien kasvun muutokset muuttuvassa ilmastossa, samoin kuin lisääntynyt metsien käyttötarve edellyttävät entistä yksityiskohtaisempaa inventointitietoa metsänhoitoon ja metsien käyttöön liittyvän suunnittelun ja päätöksenteon tueksi. Esimerkiksi, lisäarvon tuottaminen puustosta metsäteollisuudelle ilman kestävien hakkuumäärien ylittämistä edellyttää inventointitietoa korjattavan puuston laadusta. Täsmällinen ja ajantasainen laatutieto mahdollistaisi lopputuotelähtöisen raaka-aineen valinnan jo tuotannon ja puunhankinnan suunnitteluvaiheessa, metsäteollisuuden puuvarastojen osittaisen siirron pystyvuustoon, ja raaka-ainehävikin hallitsemisen koko korjuu- ja tuotantoketjun osalta.

Puuston laatu tarkoittaa puuaineen ominaisuuksia, jotka vaikuttavat puun käytettävyyteen erilaisissa lopputuotteissa. Usein tarkasteluja ominaisuuksia ovat mm. puuaineen tiheys, kuitujen ja soluseinien ominaisuudet ja erilaiset puuaineen viat (kuten sisäoksat), jotka vaikuttavat sahatavaran jäykkyyteen, lujuuteen, kestävyyskykyyn, muotopysyvyyteen ja ulkonäköön. Puuaineen ominaisuuksien perusteella sahatavaralle, tukeille tai puille voidaan määrittää käyttötarkoituksesta riippuvia laatuluokkia. Puuaineen ominaisuudet määräytyvät puun kasvussa (eli puunmuodostuksessa). Muodostuvan puuaineen lustojen leveyteen ja kevät- ja kesäpuosuuteen ja kuitujen ominaisuuksiin vaikuttavat puun ikä sekä lukuiset ulkoiset seikat, kuten puulajikohtainen kasvutapa, kasvupaikka, kilpailu, ilmasto ja erilaiset häiriöt. Näiden vaikuttavien tekijöiden vaikutus puiden kasvuun voidaan havaita myös puuston ulkoisissa piirteissä, joita ovat esim. rungon järeys ja muoto sekä oksien lukumäärä, sijainti ja koko. Näitä tunnuksia voidaan kutsua myös puuston laatutunnuksiksi, tai laatuindikaattoreiksi.

Puuston laatuindikaattorit ovat haastavia mitata perinteisin inventointimenetelmin, mutta jo nykyisellään metsävarojen inventointi pohjautuu pitkälti kaukokartoitusmenetelmien käyttöön. Puuston laatuindikaattorien mittaaminen ja puuston laadun mallintaminen osana metsien inventointia voisi siis nyt olla mahdollista. Lentolaserkeilausaineistot (airborne laser scanning, ALS) sopivat puuston järeyden ja latvusrajan ennustamiseen koealamittauksista laajoille alueille. Maastolaserkeilaus (terrestrial laser scanning (TLS) taas mahdollistaa yksityiskohtaisten laatutunnusten mittaamisen koepuista, ja jos tulevaisuuden koealatieta kerätään TLS:llä, ALS-inventoinnilla ennustettavien muuttujien joukkoon voidaan lisätä uusia laatutunnuksia, joista voidaan arvioida puuaineen ominaisuuksia tai esimerkiksi korjattavan puuston laatuluokkajakauma. Riippuen halutun tiedon sisällöstä, laatuennusteet voisivat perustua esimerkiksi sahan operatiiviseen mittaustietoon tai hakkuukonetietoon. Kaiken kaikkiaan aiheesta on toistaiseksi vielä niukasti tutkimustietoa.

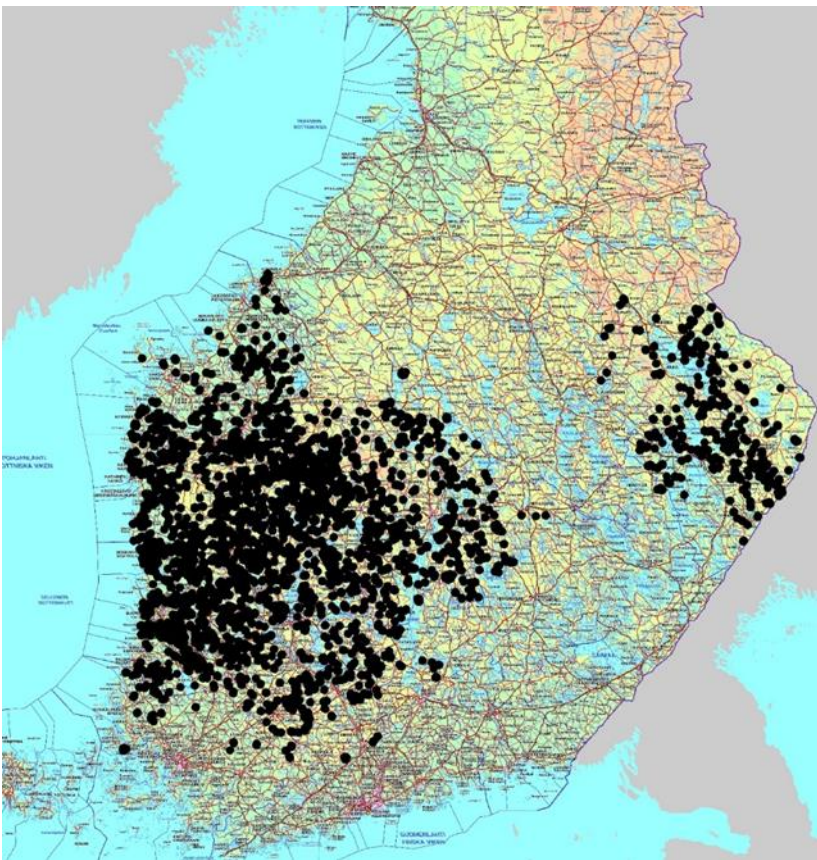
Hankkeen tavoitteena oli selvittää kaukokartoitukseen pohjautuvien inventointimenetelmien mahdollisuuksia ja kehittämistarpeita puuston laatuindikaattorien mittaamisessa ja laadun mallintamisessa, sekä siten edistää laatutiedon saattamista osaksi tulevaisuuden metsävaratietoa.

Hankkeen yksityiskohtaiset tutkimusaiheet oli jaettu seuraavasti:

- 1) Harvapulssisesta ALS-aineistosta irrotettujen piirteiden ja puuston laadun vastaavuuden selvittäminen operatiivisessa inventointimittakaavassa
- 2) Puuston laatutunnusten ennustaminen ja kalibrointi ALS-aineistojen avulla laajoille alueille
- 3) Yksityiskohtainen puuston laatutunnusten mittaaminen TLS- ja tiheäpulssisella ALS-aineistoilla, sekä näiden ja puuston laadun vastaavuuden selvittäminen

Tulokset

Ensimmäisessä osahankkeessa tutkittiin mäntytukkien laadun ennustamista avoimen, harvapulssisen ALS-aineiston laserpiirteiden ja muiden avoimena aineistona saatavien karttatietojen perusteella. Aineisto koostui kolmen mäntysahan tukkiröntgen- ja tukkimittariaineistosta, jota oli kerätty useasta tuhannesta kaupasta, sekä laserkeilausaineistosta usealta kymmeneltä keilausalueelta sahojen puunhankinta-alueilta.

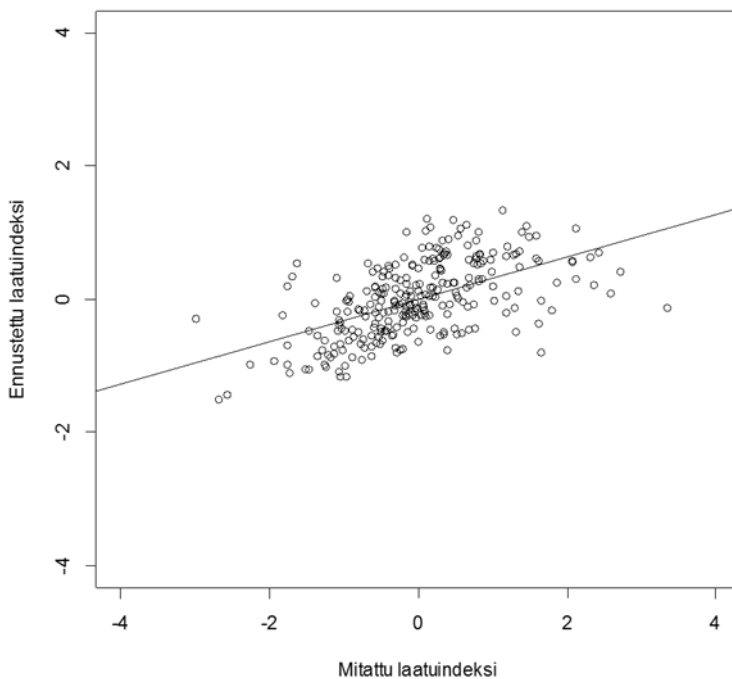


Kuva 1. Tutkimusaineiston lohkojen sijainnit.

Alkuperäisestä aineistosta valittiin ne lohkot, jotka oli laserkeilattu ennen hakkuuta ja joiden tukkiröntgenaineisto voitiin tunnistetietojen perusteella kohdentaa yhdelle yhtenäiselle kuviolle. Aineiston suodatuksen jälkeen alkuperäinen noin 10 000 lohko- ja kuviogeometrian aineisto väheni 310 kuvioon. Suurin syy aineiston vähenemiseen oli se, että sahoilla mitattu aineisto kohdistuu kauppaan ja kauppa voi sisältää tukkeja usealta lohkolta. Kaupan lohkojen välinen vaihtelu voi olla suurta. Lohkolla voi lisäksi olla useita toisistaan erillisiä kuvioita, joissa puuston ja kasvupaikan piirteet voivat vaihdella. Valitsemalla vain ne kaupat, joiden tiedot kohdistuivat yhteen lohkoon ja joissa lohkolla on vain yksi kuvio, pyrittiin vähentämään lohkojen välisistä eroista johtuvaa kohinaa. Tukkiröntgenaineiston analyysissä voitiin hyödyntää kaikkia lohkoja, mutta laserkeilausanalyysi ja puuston laadun ennustemalli laadittiin suodatetulla aineistolla.

Tukkiröntgenlaitteistolla ja tukkimittarilla voidaan mitata useita kymmeniä laatutunnuksia. Monet laatutunnukset korreloivat vahvasti keskenään. Lisäksi havaittiin, että eri sahoilla mitatut laatutunnukset eivät ole yhteismitallisia. Eri sahoilla voi olla käytössä eri mittalaite tai mittalaite on säädetty mittaamaan hieman eri asioita. Tämän takia päädyttiin laatimaan yleistettävä laatuindeksi, joka muodostettiin vain valituista laatutunnuksista, jotka normalisoitiin mahdollisten mittalaitteista johtuvien erojen vähentämiseksi. Laatuindeksiin valittiin vain sellaiset laatutunnukset, jotka voitiin yhteismitallistaa eri sahojen kesken ja joiden voitiin ajatella kuvaavan yleistä tukkipuun laatua. Valitut laatutunnukset olivat A-laatuisten tyvitukkien osuus, oksaryhmien väli ja oksaisuusindeksi (oksien suhteellinen osuus). Laatuindeksi kuvaa yleistä laatua ja sen tulkinta on yksinkertaista: arvo nolla on keskimääräinen laatu, nollaa pienempi keskimääräistä huonompi laatu ja nollaa suurempi keskimääräistä parempi laatu.

Valituille kuvioille laskettiin keilausaineistosta laserpiirteitä ja VMI-karttatiedosta muita selittäviä piirteitä. Lisäksi laskettiin topografinen kosteusindeksi tarkasta maastomallista. Selittävät piirteet laskettiin puustohilalle, josta ne yleistettiin kuvioille käyttäen keskiarvoa ja varianssia. Korrelaatioanalyysin perusteella parhaita mäntytukin laatua selittäviä muuttujia olivat puuston järeyttä kuvaavat lasertunnukset (laserpituus), latvusrajaa kuvaavat laserpiirremuunnokset (laserpiirteisiin perustuvat ns. latvusrajamallit) sekä VMI-karttatiedosta johdettu kasvupaikka ja puulajiosuudet. Suurempi laserpituus indikoi puuston järeyttä ja siten sillä on positiivinen korrelaatio laatuindeksin kanssa. Myös latvusrajaennusteen ja laatuindeksin välillä oli positiivinen korrelaatio, eli korkeampi latvusraja indikoi parempaa laatua. Kasvupaikan ja laatuindeksin välillä oli negatiivinen korrelaatio; karummalla kasvupaikalla kasvavat männyt ovat keskimäärin parempilaatuisia kuin rehevimmillä kasvupaikoilla kasvavat. Sekametsä indikoi parempaa mäntytukin laatua kuin puhdas männikkö. Näiden muuttujien perusteella laadittiin keskimääräistä mäntytukin sisäistä laatua kuvaava ennustemalli, jonka selitysaste oli yli 0,3. Lopulliseen malliin valittiin selittäviksi muuttujiksi laserpituus (95:s laserkorkeuspersentiili), laserpiirteisiin perustuva latvusrajaennuste (Korhonen 2012) ja kasvupaikka.



Kuva 2. Mitattu ja ennustettu laatuindeksi.

Tulosten perusteella sahojen tukkiröntgenaineistoja ja operatiivisia kaukokartoitus- ja kartta-aineistoja yhdistämällä voidaan ennustaa mäntytukkien sisäistä laatua suurille alueille, kun ennustemallin tulosta tulkitaan suuntaa-antavana ”paremmuusjärjestyksenä”. Tunnus voidaan laskea mille tahansa päätehakkuukohteelle ja sitä voidaan käyttää muut halutut ominaisuudet (puutavaralajikertymä, sijainti, korjuukelpoisuus...) täyttävien kohteiden järjestämisessä laadun perusteella paremmuusjärjestykseen.

Malli voitaisiin laatia myös suoraan avoimesta metsävaratiedosta saatavien muuttujien perusteella, jolloin ei välttämättä tarvitse prosessoida suurta määrää laserkeilausaineistoa. Tällöin edellytyksenä on, että metsävaratiedossa olisi mukana latvusrajaennuste. Se voisi olla tuotettu esimerkiksi jollain toisessa osahankkeessa kehitetyllä menetelmällä. Sahoilla tehtävien mittausten yhteismitallistaminen ja mittaustietojen standardisointi mahdollistaisi suurempien aineistojen hyödyntämisen ennustemallien laadinnassa. Lisäksi menetelmän kehittäminen operatiiviseksi edellyttää, että sahojen ja hakkuukoneiden katkenta- ja mittaustiedosta lasketut puuston laatua kuvaavat tunnusluvut yhdistetään aina tarkkaan paikkatietoon. Aineistojen kehittyessä olisi mahdollista laatia myös sahakohtaisia täsmämalleja, joilla voitaisiin estimoida juuri kyseisen sahan laatukriteerien mukaista laatua.

Toisessa osahankkeessa selvitettiin puuston laatutunnusten kuten latvusrajan, järeyden ja tukkiosuuden laserkeilauspohjaisten ennustemallien tarkkuutta ja kalibrointia eri inventointialueiden välillä. Aineistoina käytettiin neljää laserkeilaustutkimusalueita Itä-Suomesta, joilta kaikilta oli mitattu myös maastokoealoja. Kuhmon tutkimusalueella selvitettiin puuston metsikkötason latvusrajan ennustamista erilaisilla menetelmillä. Liperin, Kiihtelysvaarana ja Kolin tutkimusalueilla selvitettiin puolestaan puutason tunnusten ennustamista ja ennustemallien soveltamista ja kalibroimista toisille tutkimusalueille. Liperissä selvitettiin myös pystyapteratun tukkiosuuden ennustamista.

Metsikkötason latvusrajan ennustamista vertailtiin lähimmän naapurin menetelmän (k nearest neighbours, k-NN) sovelluksella, jossa puutasolla yleistetään läpimitan ja pituuden lisäksi myös latvusraja, puutason sekamallilla, koelatason regressiomallilla ja suoraan laserpisteaineistoon perustuvalla alpha shape –estimaatilla (Maltamo ym. 2018). Kaikki menetelmät tuottivat metsikkötasolla n. 1-1,5 m tarkkuuden. Tarkimmat tulokset tuotti koelatason regressiomalli, mutta se soveltuu vain metsikkötason tarkasteluihin kuten myös alpha shape estimaatti. Puulajeittain sekamalli soveltui männyille ja alpha shape kuusikoille. Yleisesti ottaen soveltuvien menetelmä oli kuitenkin lähimmän naapurin menetelmä, sillä se tuotti tarkat tulokset kaikissa puulajiositteissa, se palauttaa puuston tarkastelun puutasolle, vaikka ennustavat lasermuuttujat ovat aluepohjaisia, ja on myös menetelmällisesti yhteensopiva nykyisen inventoinnin kanssa.

Toisessa vaiheessa puutason tunnuksia, kuten läpimitta, pituus, latvusraja, tilavuus ja tukkitilavuus mallitettiin simultaanisesti epäparametrisella k-NN lähestymistavalla (Karjalainen ym. 2019a), sekä sekamallitekniikkaan perustuvalla monivastemallilla (Maltamo ym. 2019). Malliennusteiden tarkkuuksia tarkasteltiin kahdella erillisellä laserkeilausalueella, joilla laseraineiston tekniset ominaisuudet poikkeavat mallitusaineistosta. Tulokset osoittivat, että mallien siirtäminen toisille alueille heikentää tarkkuutta, mutta ei kuitenkaan erityisen paljon. Sekamallien osalta tarkkuutta voidaan edelleen parantaa suorittamalla paikallista metsikkötason kalibrointia puukohtaisilla maastomittauksilla. Sekä lähimmän naapurin menetelmä että sekamallit toimivat loogisesti tilanteissa, joissa selittävien muuttujien ominaisuudet muuttuvat ja sekamallit ovat myös loogisesti kalibroituissa muuttuneissa olosuhteissa.

Osahankkeen viimeisessä vaiheessa tarkasteltiin pystyapteratun tukkitilavuuden metsikkötason ennustamista laserpiirteillä (Karjalainen ym. 2019b). Liperin tutkimusalueella määritettiin maastossa mäntyvaltaisilta koealoilta tukkivähennykset ja runkokäyrän avulla laskettiin todellinen tukkitilavuus, jota mallitettiin sekamalleilla ja k-NN puulistojen kautta. Vaihtoehtoisesti vertailtiin ennustaa teoreettinen tukkitilavuus, jota

kalibroitiin Mehtätalon tukkivähennysmallilla. Tarkimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui suora sekamallimalli, jonka virhetaso oli n. 21%, kun taas olemassa oleva tukkivähennysmalli osoittautui harhaiseksi tutkimusaineistossa. Kaiken kaikkiaan tulokset olivat jopa yllättävän tarkkoja.

Osahanke osoitti, että apteerattu tukkitilavuus ja latvusraja voidaan robustisti ennustaa operatiivisessa käytössä olevilla aineistoilla ja tunnetuilla menetelmillä, kuten k-NN ja regressiomallit. Jos latvusraja ja apteerattu tilavuus mitataan laserinventoinnin maastokoeloilta, ne voidaan lukea mukaan inventointituloksiin ainakin männyn osalta eli yleistäminen onnistuu. Näiden tunnusten avulla voidaan tuottaa leimikoille puulistoja, joissa puiden kokoa ja latvusta kuvaavat parametrit voisivat mahdollistaa puuaineen ominaisuuksien, tai tukkilaatuluokkien arvioinnin yksittäisille puille soveltamalla esimerkiksi osahankkeen 1 havaintoja. Jälleen, sovellus edellyttää tarkkaa, paikkatietoon sidottua laatuaineistoa sahalla tai hakkuukoneelta, sekä maastossa kerättyä puuston laatutunnusreferenssiä.

Kolmannessa osahankkeessa selvitettiin yksityiskohtaisen TLS-maastoreferenssin mittaamista ALS-pohjaisen laatutunnusten ennustamisen tueksi. Aineistot koostuivat päätehakkuikäisistä mäntyleimikoista Etelä-Suomessa. Yhteensä yli 200 mäntyä keilattiin yksitellen ennen päätehakkuuta, ja yhdistettiin hakkuun jälkeen tukkiokohtaiseen tukkiröntgendataan. TLS-pistepilvistä voitiin mitata automaattisin menetelmin yksittäisten oksien lukumäärä ja läpimitat kuolleen latvuksen osalta (Pyörälä ym. 2018b, Pyörälä ym. 2019a), ja mallintaa tukkiosan runkogeometria vastaavalla tarkkuudella kuin sahalla, joskin lenkouden arviointi oli epäluotettavaa (Pyörälä ym. 2019b). TLS pistepilvistä voitiin manuaalisesti havaita n. 55 % oksakiehkuroista, jotka näkyivät tukkiröntgendatassa. Suurin osa erosta johtui ulko-oksien karsiutumisesta tukkien tyviosissa. TLS-menetelmällä mitattu koko puun suurimman oksan läpimitta ei eronnut tilastollisesti merkittävästi tukkiröntgenin mittaamasta suurimman sisäoksan läpimitasta. Verrattuna maastomittauksiin, alimman kuolleen oksan korkeus yliarvioitiin TLS-aineistosta n. 1 metrillä. Automaattisella menetelmällä päästiin käytetyssä aineistossa 71.7 % havaintotarkkuuteen tukkiosissa verrattuna manuaalisiin mittauksiin. Merkittävimmät tekijät, jotka vaikuttivat havaintotarkkuuteen, olivat etäisyys keilaimesta, peitteisyys ja tuuli. Tuloksien perusteella vaikuttaa siltä, että luotettavia oksatietoja voidaan saada erityisesti kuolleen latvuksen alueelta.

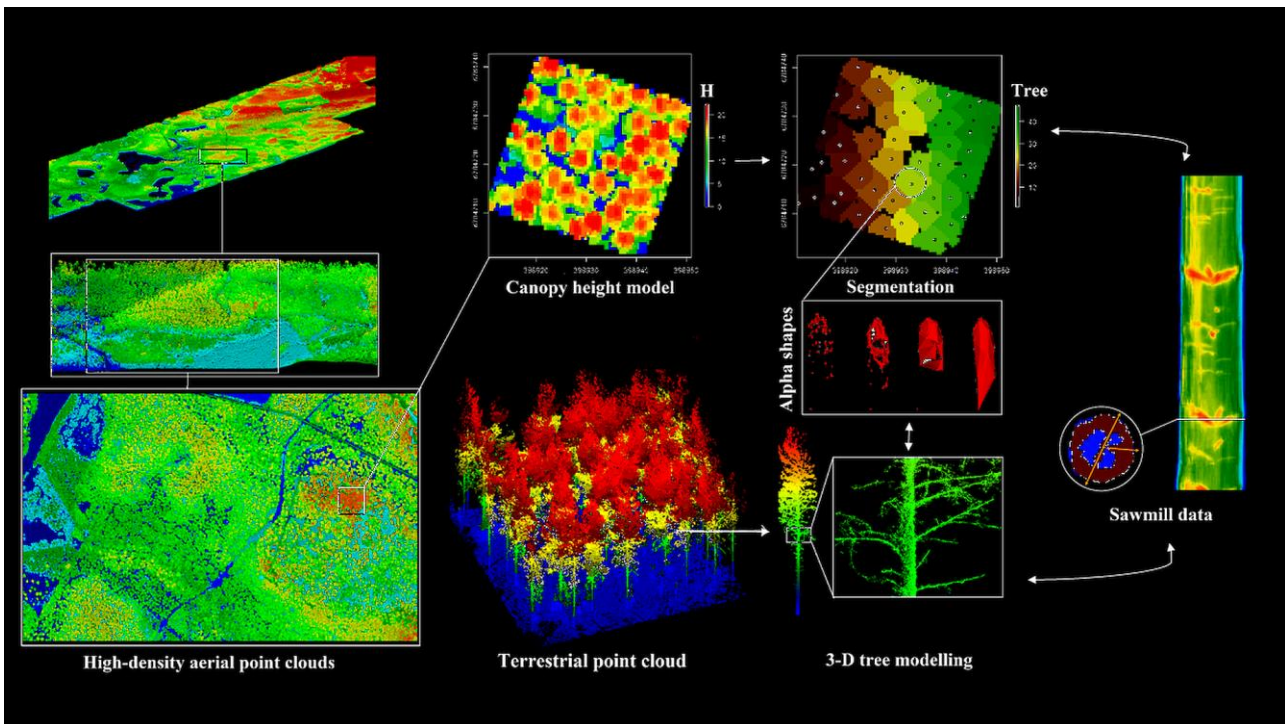
Havaintojen perusteella TLS:llä hankittu maastoreferenssi mahdollistaa puuaineen tiheyden, oksavälien pituuden sekä suurimman oksan läpimitan mallintamisen koepuille suhteessa sahojen mittaustietoon (Pyörälä 2018a, Pyörälä 2019b). Menetelmää hyödyntämällä voitaisiin siis tarkentaa ALS-yleistyksessä käytettävien puulistojen laatuarviota, ja laatia yksityiskohtaisempia laatuennusteita laajoille inventointialueille. Tätä olettamusta testattiin tutkimuksessa, jossa tiheäpulsisesta ALS-aineistosta irrotetuilla piirteillä ennustettiin TLS-aineistosta mitattuja laatutunnuksia, kuten latvusraja, alin kuollut oksa, ja suurimman oksan läpimitta (Pyörälä ym. 2019c). Tuloksien perusteella ALS-piirteillä ennustetuilla laatutunnuksilla voitiin erotella metsiköt toisistaan. Hakkuukypsien metsien välillä havaittiin systemaattinen ero latvusrajan korkeudessa; menetelmää voitiin siis käyttää arvioimaan järeydeltään samankaltaisen metsiköiden laatueroja.

Yhteenveto

Tutkimuksien perusteella karkeiden puuston laatuennusteiden laatiminen malleilla, joissa laserpiirteillä selitetään sahalla mitattuja puuaineen ominaisuuksia, onnistuu leimikkotasolla, jos hakkuukone- ja saha-aineistot on sidottu paikkatietoon. Ennustemalleissa selittävinä tekijöinä toimivat tällä hetkellä parhaiten puuston järeys ja latvusraja, jotka voitiin luotettavasti ennustaa ALS-aineistoista. Tulevaisuudessa, tarkemman laatutiedon hankintaa voitaisiin edistää TLS-keilaukseen perustuvilla koealamittauksilla. Tällöin uusien laatutunnusten (yksityiskohtainen runkomuoto ja oksamittaukset) yhdistäminen ALS-inventoinnissa ennustettaviin tunnuksiin saattaisi parantaa laatuennusteiden tarkkuutta.

Tutkimuksien yhteenvetona hahmoteltu tulevaisuuden laatutiedon inventointiketju (Kuva):

1. Puuston laatutunnukset mitataan koaloilla TLS:llä:
 - Runkomuoto ja oksaisuustiedot (Pyörälä ym. 2018a, 2018b, 2019a)
2. Laatutunnukset yleistetään koko inventointialueelle/ kalibroidaan toiselle alueelle ALS laserpiirteillä
 - Leimikkokohtaiset jakaumat (Karjalainen ym. 2019b, Maltamo ym. 2018)
 - Puulistat, ennustetaan yksittäisten puiden laatutunnukset (Karjalainen ym, 2019a Maltamo ym.2019, Pyörälä ym. 2019b)
3. Ennustetaan laatutunnuksilla puuston laatua suhteessa sahojen mittaustietoon, useita vaihtoehtoja:
 - Puuaineen ominaisuudet (tiheys, oksaisuus jne) (Arbonaut)
 - Laatuluokkajakaumat (Arbonaut)
 - 3D -tukkimallit ja sisälaatuennuste, TLS ja sahadatan perusteella (ts. etsitään sahadatasta vastaavia tukkeja kuin koaloilla mitatut pystypuut) (Pyörälä ym. 2019a)



Kuva. Tulevaisuuden laatutiedon inventointiketju. Tiheäpulsiset ALS-aineistot mahdollistavat puukohtaisten piirteiden, ja esim. alpha-shape latvusmallien irrottamisen laajoilla alueilla. TLS-aineistoista voidaan mitata koepuille tarkkoja 3-D runko- ja oksatunnuksia, joita voidaan mallintaa ALS-piirteiden perusteella yli koko inventointialueen. Puuston laatu ennustetaan TLS-koepuumittausten ja sahojen laatutiedon perusteella.

Keskeiset kehittämistarpeet laatutiedon saattamiseksi osaksi kaukokartoitukseen perustuvaa metsävarojen inventointia (erityisesti metsäteollisuudessa) ovat siis 1) tarkan paikkatiedon tallentaminen operatiivisessa puunkorjuussa, 2) siirtyminen tiheäpulsisempien avoimien ALS-aineistojen keruuseen, sekä 3) TLS:n käyttöönotto ja laatutunnusten mukaanotto koalamittauksissa.

Kirjallisuus

Korhonen, M. 2012. Puuston latvusrajan ennustaminen harvapulssisesta laserkeilausaineistosta mäntyvaltaisella alueella ja latvusrajan mittauksen tehostaminen. Metsäsuunnittelun ja -ekonomisen Pro gradu. Itä-Suomen Yliopisto, Luonnontieteen ja metsätieteiden tiedekunta.

Hankkeen julkaisut

Karjalainen, T., Korhonen, L., Packalen, P. and Maltamo, M. 2019a. The transferability of airborne laser scanning based tree level models between different inventory areas. *Canadian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0128>

Karjalainen, T., Packalen, P., Rätty, J. and Maltamo, M. 2019b. Predicting the factual sawlog volume in Scots pine dominated forests using airborne laser scanning data. *Käsikirjoitus*.

Maltamo, M., Repola, J., Karjalainen, T., Korhonen, L. & Packalen, P. 2019. Transferability and calibration of tree level mixed-effects models using airborne laser scanning. *Käsikirjoitus*.

Maltamo, M., Karjalainen, T., Repola, J. and Vauhkonen, J. 2018. Incorporating tree- and stand-level information on crown base height into multivariate forest management inventories based on airborne laser scanning *Silva Fennica* 52:33. <https://doi.org/10.14214/sf.10006>

Pyörälä, J.; Kankare, V.; Liang, X.; Saarinen, N.; Rikala, J.; Kivinen, V-P.; Sipi, M.; Hyypä, J.; Holopainen, M.; Vastaranta, M. 2019a. Assessing log geometry and wood quality in standing timber using terrestrial laser-scanning point clouds. *Forestry* 92:2, 77-87. <http://www.doi.org/10.1093/forestry/cpy044>

Pyörälä, J., Saarinen, N., Kankare, V., Coops, N., Liang, X., Wang, Y., Holopainen, M. Hyypä, J. Vastaranta, M. 2019b. The variability of wood quality with respect to stand- and tree-level dynamics studied using airborne and terrestrial laser scanning. *Käsikirjoitus*.

Pyörälä, J.; Kankare, V.; Vastaranta, M.; Rikala, J.; Holopainen, M.; Sipi, M.; Hyypä, J.; Uusitalo, J. 2018a. Comparison of Terrestrial Laser Scanning and X-ray Scanning in Measuring Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Branch Structure. *Scand J Forest Res* 33:3, 291-298. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1355409>

Pyörälä, J.; Liang, X.; Vastaranta, M.; Saarinen, N.; Kankare, V.; Wang, Y.; Hyypä, J.; Holopainen, M. 2018b. Quantitative assessment of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) whorl structure in a forest environment using terrestrial laser scanning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11:10, 3598-3607. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2819598>

Pyörälä, J.; Liang, X.; Saarinen, N.; Kankare, V.; Wang, Y.; Hyypä, J.; Holopainen, M.; Vastaranta, M. 2018c. Assessing branching structure for biomass and wood quality estimation using terrestrial laser scanning point clouds. *Canadian Journal of Remote Sensing* 44:5, 462-475. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1557040>