

Tapio Räsänen, Timo Melkas, Kirsi Riekkö, Juha-Antti Sorsa, Asko Poikela ja Jarmo Hämäläinen

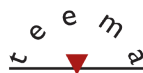
Hakkuukoneet metsätiedon tuottajina

Räsänen T., Melkas T., Riekkö K., Sorsa J.-A., Poikela A., Hämäläinen J. (2019). Hakkuukoneet metsätiedon tuottajina. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10250. Tieteen tori: Metsätieto ja sähköiset palvelut. 9 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10250>

Yhteystiedot Metsäteho Oy, Vantaa

Sähköposti tapio.rasanen@metsateho.fi

Hyväksytty 4.10.2019



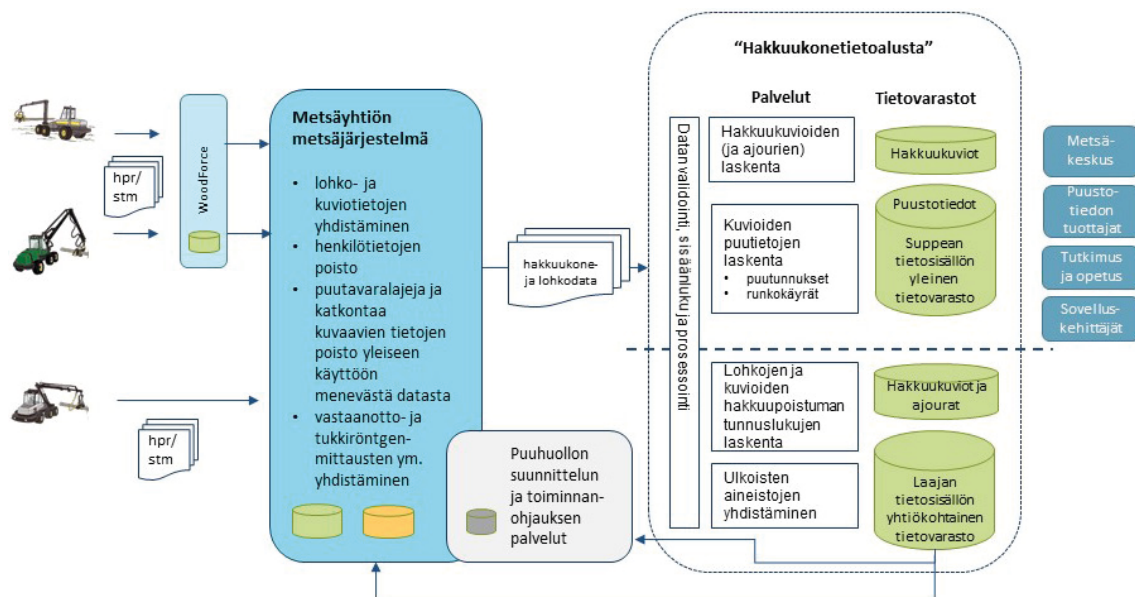
Metsätieto ja sähköiset palvelut

Metsätieto ja sähköiset palvelut -hankkeen yhtenä kehittämisen painopistealueena oli metsäkoneilla – erityisesti hakkuukoneilla – tuotettavan tiedon käyttö osana tulevaisuuden metsävaratiedon kokonaisuutta. Koneiden mittausjärjestelmien avulla kerätään jatkuvasti suuria määriä dataa hakattavasta puustosta. Mittaustiedoista voidaan muodostaa yksittäisiä puita ja hakkuualueita tarkasti kuvaavaa uutta tietoa. Tietoa voidaan käyttää perinteisten lähestymistapojen lisäksi big data -analysointimenetelmien avulla metsiä ja korjuuolosuhteita kuvaavan tarkennetun tiedon muodostamiseksi ja siihen voidaan yhdistää muita tietolähteitä.

Jalostettua hakkuukonetietoa on mahdollista hyödyntää osana avointa metsävaratietoa, kunhan tiedon hallinnan toimintamallit ja käytön pelisäännöt on sovittu ja tiedon hyödyntämisen alustat ja rajapinnat toteutettu. Metsäkonetiedon välitys keskitettyyn tietokantaan ja tietokantasovelluspilotti -osahankkeessa luotiin tekniset ja tiedonhallinnalliset perusteet hakkuukonetiedon jalostamiseksi sekä hyödyntämiseksi metsätalouden ja puunhankinnan tietojärjestelmissä ja käyttösovelluksissa. Hankkeen tuloksien varaan onkin jo ryhdytty suunnittelemaan käytäntöä palvelevia tuotannollisen mittakaavan tietojärjestelmiä ja sovelluksia.

Hakkuukonetietovarastot

Laajamittainen hakkuukonetiedon hankinta voidaan toteuttaa ilman erillisjärjestelyitä normaalin hakkuun tuotantotiedon siirron yhteydessä erityisesti niissä puunhankintaorganisaatioissa, joiden tietojärjestelmät tukevat uutta XML-pohjaista StanForD 2010 -metsäkonestandardia. Tietojen prosessointi ja siirto tietovarastoihin voi olla lähes kokonaan automaattinen toimintoketju (kuva 1). Tietojen välitys puunhankkijan ulkopuoliseen järjestelmään edellyttää kuitenkin tarvittavien tiedon-



Kuva 1. Hakkuukonetiedon siirron toimintamalli. Kuvassa hakkuukonetietoalusta kuvaa pilvipalvelupohjaista alustaratkaisua, joka tarjoaa tarvittavan teknologiapohjan tietovarastoille ja tietojen prosessoineille. Se voi olla osa Metsäkeskuksen metsätietoalustaa tai yksityisluonteinen puuhuollon toimijoiden ylläpitämä alusta.

siirtorajapintojen toteuttamista. Hakkuukoneille asetettavia vaatimuksia on, että kaadettujen puiden sijaintitieto tallennetaan: koneiden GNSS-paikannuksen on oltava päällä ja paikannustarkkuuden kunnossa. Muutoin tietojen tuottaminen ei aiheuta muutoksia hakkuukoneen tiedonhallintaan tai toimintoihin.

Hankkeen kuluessa laadittiin puunhankinnan toimialan yhteistyönä metsäkonetiedon omistusta ja käyttöä koskeva suositus. Sen mukaisesti hakkuukoneen tuotannolliset mittaustiedot (stm-, hpr- ja thp-tiedostot) ovat urakanantajaosapuolen omistusoikeuden piiriin kuuluvia. Oikeus käyttää tietoja vapaasti on siten urakanantajilla. Muilla osapuolilla se voi olla urakanantajan antamaan lupaan perustuen. Tietojen käytön keskeisiä vaatimuksia on, että kaikki henkilötiedot ja liiketoimintakriittisiksi katsotut tiedot poistetaan jo valmiiksi prosessoitavasta datasta tai yhteisesti jaettavaan tietovarastoihin siirron yhteydessä. Metsäkonetiedon omistus- ja käyttöoikeuksien suositus luo näin osaltaan raamit hakkuukonetietojen kokoamiseksi tietovarastoihin sekä käyttämiseksi osana avoimia metsävaratietoja erilaisissa sovelluksissa.

Hankkeessa toteutettiin hakkuukonetietovaraston pilottiversio Metsätehon tietojärjestelmäympäristöön. Tietovaraston suunnittelua varten kuvattiin keskeisimmät käyttötapaukset ja niiden tietovaatimukset. Pilottitietovaraston tietomalli määritettiin perustuen StanForD 2010:n tietorakenteisiin, mutta lisäksi siinä huomioitiin käyttösovellusten tietosisältötarpeet. Hakkuukonetietojen tarkastus- ja käsittelyohjelmat tehtiin ja tiedot prosessoitiin SQL-tietokantaan. Keskeisenä osana tietovaraston muodostamista toteutettiin hakattujen puiden runkokäyrien muodostus Metsätehossa aiemmin kehitettyjen algoritmien sekä Laasasenahon runkokäyräyhtälöiden pohjalta. Hakkuukonetietovarasto ja puukohtainen runkokäyrien sovitusten menetelmä mahdollistavat myös alueellisten ja nykyistä tarkempien tilavuusmallien muodostamisen. Kokeiluluonteisesti laadittiin myös runkokäyriin perustuvat hukkalatvan pituusmallit havupuille.

Julkisten metsävaratietojen ajantasaistus toteutuneiden hakkuiden osalta on yksi tärkeimmistä hakkuukonetiedon hyödyntämisen kohteista. Tätä varten hankkeessa kehitettiin paikkatiedon käsittelyyn perustuva menetelmä hakkuukuvioiden muodostamiseksi puukohtaisista mittaustiedoista. Hakkuukuvioinnin ohella kehitettiin ajouraston muodostamisen ja sen tunnuslukujen laskennan menetelmät puunkorjuun laadun seuranta varten.

Hakkuukoneilla mitattuja puutietoja voitaisiin tulevaisuudessa tuottaa myös avoimeksi metsävaratiedoksi ja käyttää niitä eri tavoin inventoinneissa, puuston ennustemalleissa ja inventointitiedon tarkkuuden ja luotettavuuden arvioinnissa. Metsävaratiedon laadun arvioinnissa hakkuukone-tieto tarjoaa tiedon tuotannosta vastaaville toimijoille tai tutkijoille mahdollisuuksia vertailla puustoinventoinnin tuloksia hakkuissa mitattuun puustotietoon. Käyttökohteista potentiaalisin on hakkuukonetiedon soveltaminen kaukokartoituksen maastomittauksia täydentävänä tai osittain korvaavana aineistona.

Puunhankinnassa ja metsäteollisuuden tuotannonohjauksessa hakkuukonetiedoilla ja niihin yhdistetyillä muilla puunkorjuun olosuhteita tai puuston laatua kuvaavilla mittaustiedoilla nähdään olevan paljon hyödyntämismahdollisuuksia. Katkonnan ohjausta ja siinä käytettäviä analysointi- ja ennustemenetelmiä ollaan parhaillaan kehittämässä ja ottamassa tuotantokäyttöön. Esimerkkeinä datalähtöisistä menetelmistä ovat hakkuukonetietovarastoihin perustuva leimikoiden runkoluku-sarjojen ennustaminen ja katkontavaihtoehtojen simulointi sekä näiden tukena käytettävä tyyppi-leimikointi. Tyyppileimikoinnin yhtenä tavoitteena on luokitella jalostusarvoltaan erilaiset leimikot sahatukkien sisäistä laatua kuvaavien tunnusten kanssa parhaiten korreloivien puusto- ja olo-suhdetunnusten mukaan. Luokittelulla pyritään siihen, että erityisesti sahauksessa voitaisiin eri tuoteryhmiin ohjata käyttöarvoltaan parasta saatavilla olevaa puuta ja että puutavaralajien jakaumatavoitteet ja katkonta-asetukset tukisivat arvoon perustuvaa puutavaratuotantoa.

Hakkuukonetietovarastoja voidaan käyttää myös muuten puunhankinnan ja puutavara-toimitusten suunnittelun ja ohjauksen sekä oston suuntaamisen tukena, puutavaralajien hinnoitteluperusteiden muodostamisessa ja vertailuissa sekä leimikoiden jalostusarvotarkasteluissa. Kun runkokohtaisessa mittaustiedossa mukana ovat koordinaatit, voidaan tietovarastoja hyödyntää metsäyhtiöissä myös toteutuneen korjuun seurantaan sekä metsänuudistamisen suunnittelun avuksi. Yhdistämällä hakattujen puiden sijaintitieto tarkkaan hilamuotoiseen metsävaratietoon ja luontokohteita kuvaavaan paikkatietoon voidaan monitoroida hakkuiden voimakkuutta harvennuksilla, tarkastella luontokohteiden ja erilaisten suojavyöhykkeiden rajauksia hakkuussa tai arvioida jätettyjen säästöpuiden määrää.

Tutkimusaineistot

Metsäkonetiedon välitys keskitettyyn tietokantaan ja tietokantasovelluspilotti -osahankkeessa käytettiin Forest Big Data -tutkimushankkeessa vuosina 2015–2016 kerättyä hakkuukoneaineistoa, joka sijoittui Suomen metsäkeskuksen vuonna 2015 laserkeilatulle Uudenmaan ja pääkaupunkiseudun inventointialueelle. Aineisto koottiin metsäyhtiöiden hakkuukohteilta ja siinä olivat edustettuina yleisimmät hakkuukonemerkit. Yhdellä leimikolla saattoi olla useampia korjuulohkoja, joista kustakin muodostettiin lopulliseen tietokannan aineistoon omat hakkuukuvionsa. Kaikkiaan tämä aineisto käsitti 635 350 runkoa, jotka oli hakattu 464 lohkolta.

Jokaiselta leimikon lohkolta kerättiin StanForD-standardin mukaiset tiedot hakatusta puustosta stm- ja prd-tiedostoihin. Hakkuukoneella tallennettiin rungon prosessoinnin aikana jokaisesta rungosta tunnistetietojen lisäksi seuraavat tiedot: puulaji, käyttöosan läpimitat 10 cm välein (runkoprofiili), käyttöosan pituus sekä viimeisen katkaisusahauksen läpimitta. Rungoista tallennettiin myös puun sijainti: hakkuukoneen sijainti ja mahdollisuuksien mukaan myös hakkuulaitteen sijainti kaatohetkellä. Lisäksi jokaisesta tehdystä pölkystä tallennettiin pölkyn pituus, latvaläpimitta, tilavuus ja puutavaralaji. Hankkeen testiaineistoina käytettiin lisäksi erikseen koottuja n. 3000 korjuulohkon hpr-tiedostoja, jotka hankittiin katkonnan ohjauksen yritys-hankkeen tarpeisiin. Forest Big Data -hankkeen hakkuukoneaineistoja käytettiin myös seuraavissa kappaleissa kuvattujen tutkimustehtävien ja osahankkeiden aineistoina.

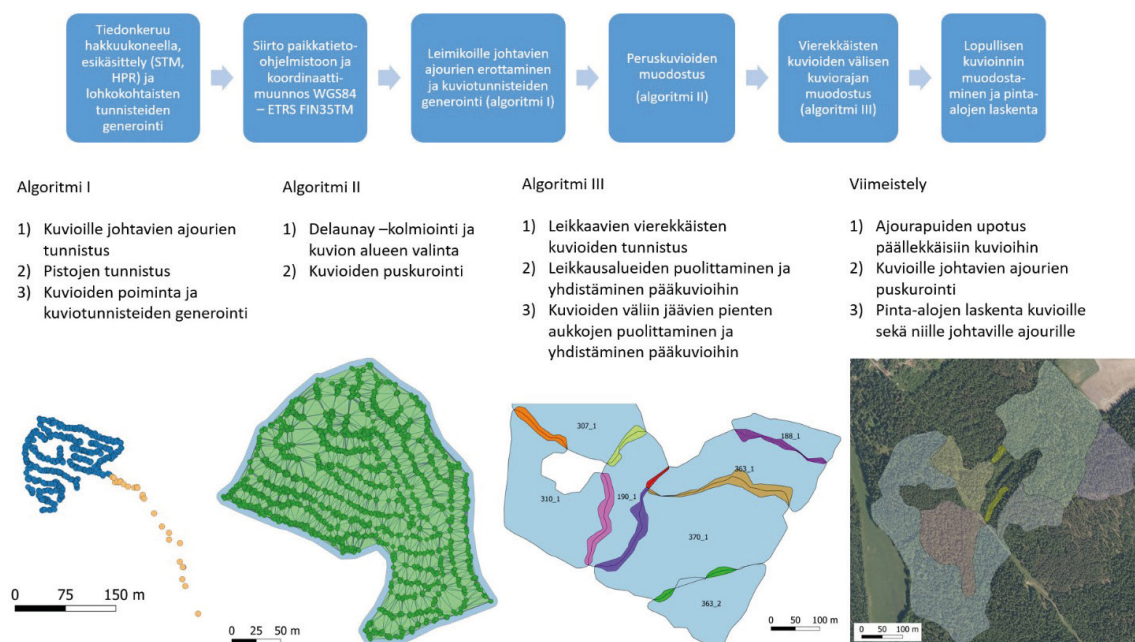
Hakkuukuviointi ja ajourien muodostus

Metsätehossa kehitetyllä menetelmällä voidaan tuottaa hakkuukoneen tallentamista sijaintitiedoista automaattisesti toimenpidekuvion aluerajaus ja ajourat sekä laskea ajouratunnukset kuviokohtaisesti. Tulokset näyttävät lupaavilta ja menetelmä avaa uusia mahdollisuuksia hakkuukonetiedon hyödyntämiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää hakkuukoneen keräämään tietoon perustuva automaattinen hakkuualueen rajausmenetelmä, jota voidaan hyödyntää metsävaratietojen ajantasaisuudessa. Menetelmä muodostaa kuviorajaukset sijainti- ja tunnistetietojen pohjalta, erottaa kuvioille johtavat ajourat sekä käsittelee osittain päällekkäiset kuviot niin, että kuvion rajaus muodostuu eheäksi. Menetelmän kehittäminen tehtiin vaiheittain edeten puoliautomaattisesta menetelmästä täysin automatisoituun menetelmään. Noin puolet tutkimus- ja testiaineistosta oli avo-, siemenpuu- tai suojustruppuhakkuita, kolmasosa harvennuksia ja loput muita hakkuutapoja.

Menetelmässä hyödynnetään korjuulohkon tunnistetietoja, hakkuun aloitusajankohtaa sekä hakkuukoneen sijaintitietoa puuta kaadettaessa. Myös kuviokohtainen hakkuutapa on oltava tiedossa. Tässä tutkimuksessa hakkuutapatieto kerättiin metsäyhtiöiltä, mutta jatkossa yksiselitteinen hakkuutapa kullekin korjuulohkolle tulisi saada StanForD 2010 -standardin mukaisissa hpr-tiedostoissa yhdessä muiden hakkuukonetietojen kanssa. Kuviokohtainen hakkuutapa on mahdollista saada puunkorjuun ennakkosuunnittelutiedoista ja yhdistää se paikkatietona laskennassa muuhun hakkuukonetietoon.

Varsinainen kuviointimenetelmä koostuu kolmesta eri algoritmista (kuva 2). Ensimmäisessä vaiheessa keskiarvoistetaan hakkuukoneen sijainnit, erotetaan kuvioille johtavat ajourat, kootaan toimenpidekuviot ja liitetään pistot oikeisiin kuvioihin mukaan. Toisessa vaiheessa kuvioille muodostetaan aluerajaukset Delaunay-kolmioinnilla ja syntyneitä kuviorajauksia puskuroidaan tietyin parametrein. Lopuksi päällekkäin menevien viereisten kuvioiden välille muodostetaan



Kuva 2. Toimenpidekuvioiden automaattinen rajausmenetelmä ja eri algoritmien kuvaus pähkinänkuoressa. Ilmakuvat: copyright Maanmittauslaitos.

eheät, siistityt rajaukset. Kuviot viimeistellään upottamalla kuvioille johtavat ajourat sellaisiin muihin kuvioihin, jonka aluerajauksen sisään ne osuvat – tämä koskee lähinnä tilanteita, joissa on siirretty yhdeltä kuviolta toiselle ja samalla on jouduttu avaamaan ajoura vasta myöhemmin hakattavan leimikon läpi. Koska osa testiaineistossa kuvioille johtavista ajourista jäi kokonaan kuvioiden ulkopuolelle, tuotettiin myös niille erilliset aluerajaukset. Lopuksi menetelmä tuottaa pinta-alat muodostetuille toimenpidekuvioille ja palauttaa muodostuneet toimenpidekuviorajaukset hakkuuajankohdan, hakkuutavan ja pinta-alan kera metsävaratietojen ajantasaistukseen.

Rajaustuloksia verrattiin puoliautomaattisella menetelmällä tuotettuihin ja manuaalisesti tarkastettuihin kuviorajoihin sekä maastossa kartoitettuihin ja ilmakuvalta digitoituihin kuviorajauksiin. Automaattisesti muodostettujen toimenpidekuvioiden pinta-alat vastasivat hyvin vertailukuvioiden pinta-aloja keskiarvon, minimin, maksimin ja hajonnan osalta. Kuvioille johtavia ajouria automaattinen menetelmä tunnisti jonkin verran enemmän kuin vertailumenetelmä. Korjuulohkot jakaantuivat tuloksissa keskimäärin 1,3 toimenpidekuvioon, eli kolmesta korjuulohkosta muodostui neljä kuviota. Kuvioille johtavia ajouria löytyi 70,2 %:lta lohkoista ja hakatuista rungoista 4,6 % luokiteltiin ajouriin kuuluviksi rungoiksi. Aineistossa lohkon keskimääräinen pinta-ala oli 2,5 ha ja kuvion 1,8 ha.

Automaattinen kuviointi pystyttiin tekemään valtaosalle Uudenmaan ja pääkaupunkiseudun inventointialueen kuvioista – jopa 97,8 %:lle kaikkiaan 585 kuviosta. Satelliittipaikannuksesta (GNSS) johtuvista syistä jouduttiin hylkäämään 0,5 % kuvioista ja 0,5 % kuvioiden rajauksista jäivät onnistumatta paikkatieto-ohjelmistoon liittyvien ongelmien takia. Lopuille 1,2 %:lle kuvioista voidaan jatkossa tuottaa rajausta lisäämällä menetelmään päätteilyääntöjä.

Tutkimuksessa kehitettyä automaattista menetelmää voidaan käyttää toimenpidekuvioiden rajausten tuottamiseen pätehakkuilla ja harvennuksilla sekä kuvioille johtavien ajourien erottamiseen. Ylispuiden poiston osalta menetelmä tuottaa tiedon, miltä kuviolta ylispuita on poistettu, mutta varsinaista rajausta menetelmällä ei ole mahdollista tuottaa. Lisäksi menetelmä tunnistaa kuvioiden sisään jäävät, vähintään tietyn kokoiset käsittelemättömät alueet, mikä mahdollistaa tulevaisuudessa myös suurempien säästöpuuryhmien tunnistamisen ja dokumentoinnin – ehkäpä jatkossa puukohtaisen sijaintitiedon tarkentuessa myös pienempien puuryhmien tunnistamisen.

Suurimmat menetelmän virhelähteet liittyvät lähtötietojen epätarkkuuteen, esim. hakkuutapa-tiedon liian karkeaan luokitteluun ja hakkuukoneen sijaintitiedon paikannustarkkuuteen. Hakkuutapa-tiedon tarkentaminen kuviotasolla ja satelliittipaikannuksen yleisen tarkkuuden parantaminen hakkuukoneissa edesauttaisi kuviorajauksen onnistumista. Hakkuupään sijainnin rekisteröinti välittömästi kaatosahauksen jälkeen ja hakkuun yhteydessä tuotetun puukartan muodostaminen parantaisivat myös paikannustarkkuutta systemaattisesti.

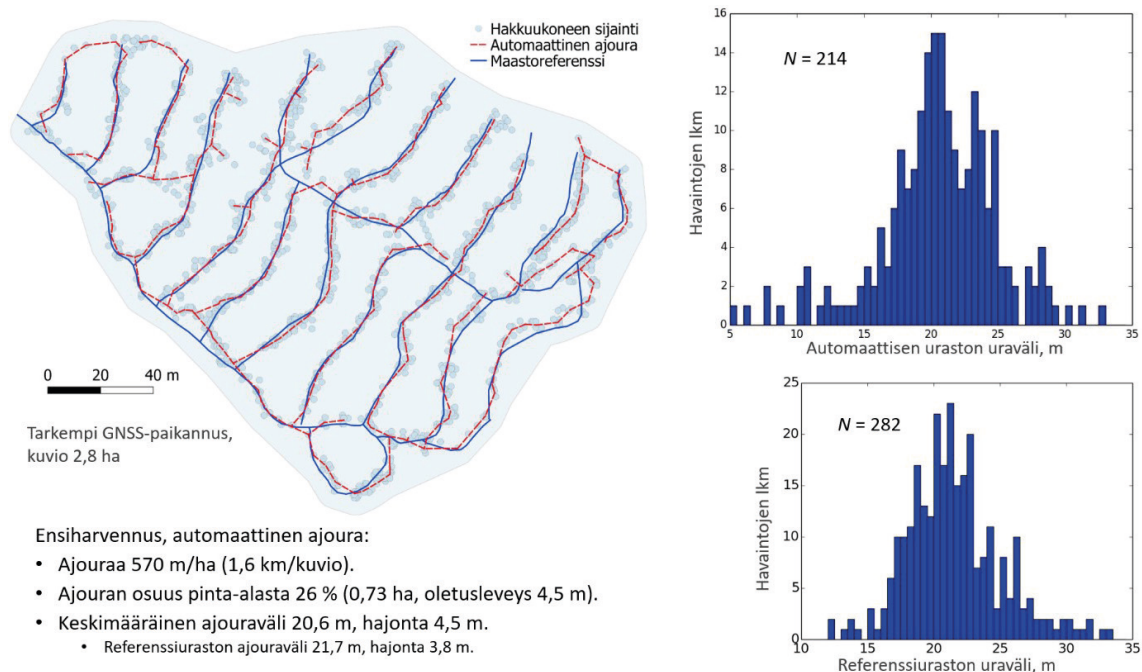
Menetelmä on tarkoitettu tuotteistava ja ottaa käyttöön yhdessä Suomen metsäkeskuksen ja Metsätehon osakkaiden kanssa. Tarkoituksena on, että jatkossa saataisiin toteutuneiden toimenpiteiden rajaukset ajantasaistettua Suomen metsäkeskuksen ylläpitämiin metsävaratietoihin ja osaksi operatiivista toimintaa. Kehitetyt laskentamenetelmät mahdollistavat myös toimenpidekuvioiden upottamisen kuviotietokantaan sekä metsävaratietojen päivittämisen kuviorajat tasapainottamalla ja eheyttämällä vierekkäisten kuvioiden kesken. Kuviointityökalun vaatimusmäärittely tuotantoversion toteuttamiseksi on tehty yhteistyössä Trimble Forestryn kanssa ja tuotantoversion pilotointi ja testaus osana tiedonvälitykseen ja -yhdistämiseen keskittyvää metsätiedon palvelualustaa on työn alla. Suomen metsäkeskus ryhtyy tuotteistamaan menetelmää syksyllä 2019 osana metsävaratiedon ajantasaistusta.

Ajourat korjuun laadun seurannassa ja laadunhallinnan automatisoinnissa

Tutkimuksessa kehitettiin automaattinen laskentamenetelmä, joka tuottaa toimenpidekuviolle ajouraverkoston perustuen hakkuukoneen sijaintitietoon puun kaatohekellä. Lisäksi tuotetulle ajouraverkostolle voidaan määrittää ajouratunnukset koko kuvion kattavasti (kuva 3). Menetelmää voidaan käyttää korjuun laadun omavalvonnassa ja laadunhallinnan automatisoinnissa, kuljettajan apuna työn suunnittelussa sekä pidemmällä aikavälillä korjuun automatisoinnissa kaikilla StanForD-standardia noudattavilla hakkuukoneilla. Edellytyksenä on, että hakkuukoneen sijainti tallennetaan puuta kaadettaessa jokaiselle puulle erikseen. Laskentamenetelmä mahdollistaa kuviokohtaisesti ajouraverkoston kokonaispituuden, ajourien pinta-alaosuuden (käytettäessä uran leveytenä vakio-arvoa) sekä keskimääräisen ajouravälin automaattisen määrittämisen.

Menetelmän hyvyttä arvioitiin vertaamalla automaattisesti tuotettuja ajouria maastossa tarkkuuspaikannettuihin ensiharvennusten ajouriin ($n=22$), ja havaittiin että pituudet ja sijainnit vastaavat toisiaan. Menetelmän etuna on tulosten vertailtavuus riippumatta konemerkestä tai uranauhoitusten asetuksista. Näin määritetty keskimääräinen ajouraväli edustaa koko kuviota kattavasti.

Verrattaessa tuloksia hakkuukoneiden karttajärjestelmien tuottamiin ajouranauhoituksiin todettiin, että ajouranauhoitukset eivät sellaisenaan sovellu ajouraverkoston pituuden arviointiin, koska havaintoväli on melko harva, jolloin sijaintien suodatus ei ole mahdollista. Ajouranauhoituksilla voidaan kuitenkin jatkossa täydentää puukohtaisesta sijaintiaineistosta tuotettua ajouraverkostoa sellaisista kohdista, joissa hakkuukone on ajanut, mutta puita ei ole kaadettu.



Kuva 3. Ensiharvennusleimikolle automaattisesti hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen muodostettu ajouraverkosto (punainen) ja menetelmällä lasketut ajouratunnukset: ajouran pituus (m/ha), ajouran osuus leimikon pinta-alasta (%) ja keskimääräinen ajouraväli. Tuloksia on verrattu maastossa GNSS-vastaanottimella paikannettuihin ajouriin (sininen).

Automaattisesti tuotettua ajouraverkosta voidaan käyttää mm. omavalvonnassa ajouratiheyden seurannassa ja kuormatraktorin kuljettajan ajo-opastuksessa. Ajouraverkosto on myös käytettävissä myöhemmillä harvennuksilla. Menetelmä on lyhyellä jänteellä askel kohti automaattista puunkorjuun laadunhallintaa ja pidemmällä aikavälillä askel kohti koneellisen puunkorjuun automatisointia.

Hakkuukonetiedon käyttö maastoreferenssinä

Tutkimuksessa selvitettiin Helsingin yliopiston, Arbonaut Oy:n ja Metsäteho Oy:n yhteistyönä hakkuukonetiedon hyödyntämistä kaukokartoitukseen perustuvan metsäinventoinnin opetusaineistona. Tutkimustulosten mukaan hakkuukoneella kerätty puustotieto päätehakkuukohteilta soveltuu kaukokartoituksen referenssiaineistoksi.

Tutkimuksessa kehitettiin menetelmä, jossa hakkuutietoa hyödynnetään kaukokartoituksen opetusaineistona metsävarojen inventoinnissa. Hakkuukoneet tallensivat puukohtaisia sijainti- ja runkotietoja avohakkuukohteilla operatiivisen toiminnan ohessa ja näistä muodostettiin referenssi-koaloja kaukokartoitusaineiston tulkintaan. Puun sijaintina käytettiin kahta eri vaihtoehtoa: hakkuukoneen satelliittipaikannettua sijaintia ja laskennallisesti paranneltua hakkuukoneen kouran sijaintia.

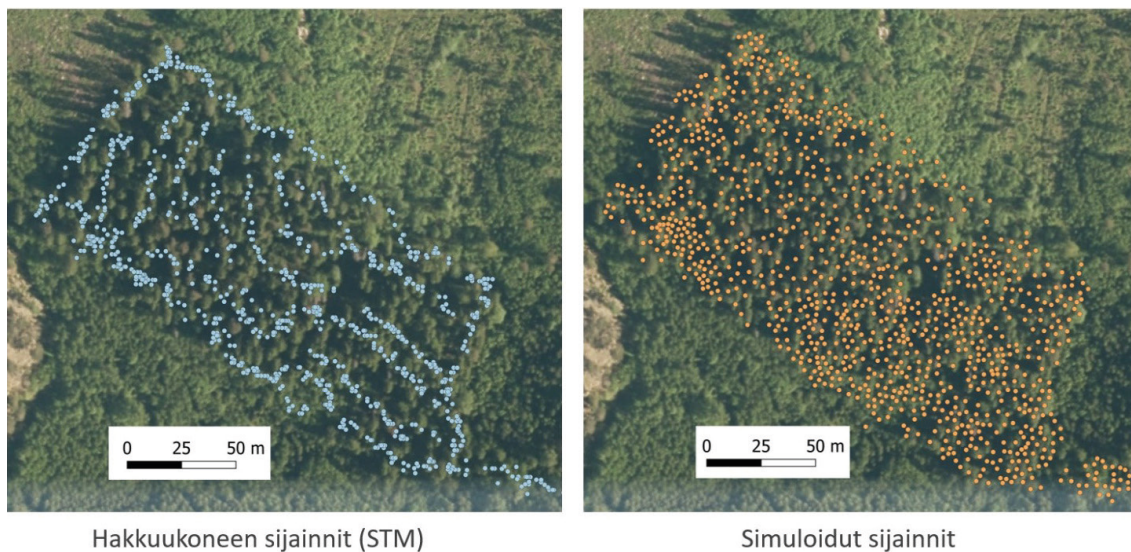
Tutkimusaineisto sisälsi 158 kuusivaltaista avohakkuukuviota Etelä-Suomesta, jotka hakattiin vuosina 2015–2016. Hakattujen runkojen ominaisuustiedot tuotettiin hakkuukoneen tallentamien tietojen pohjalta ja hakattujen kuvioiden puustotiedot johdettiin runkotiedoista. Hakatuille kuvioille muodostettiin simuloimalla koaloja, joiden koot olivat 254, 509, 761 ja 1018 m². Koalojen puustotiedot saatiin hakatuista rungoista ja koaloille määritettiin kaukokartoituspiirteet.

Ennustemalleilla saatiin riippuvuudet koalojen kaukokartoituspiirteiden ja puustotunnusten välille. Mallien hyvyyttä arvioitiin vertaamalla kuviotasolle ennustettuja ja toteutuneita puustotietoja. Havaittiin, että pohjapinta-alalla painotetut keskiläpimitta (RMSE 10–11 %) ja puun pituus (RMSE 6–8 %) eivät juuri muuttuneet, kun käytettiin eri koelakokoja tai puiden sijaintivaihtoehtoja. Ennustemallien harhat keskiläpimitalle ja puun pituudelle olivat pieniä. Pohjapinta-alan ja tilavuuden ennusteet (RMSE n. 25 % ja harha n. 15 %) olivat parhaimmillaan lähestulkoon samat kummallakin puiden paikannusvaihtoehdolla. Kouran sijaintia käytettäessä pohjapinta-alan ja tilavuuden ennusteet olivat käytännössä vakioita koalan koon ollessa 254–761 m² välillä.

Tutkimuksen tulosten perusteella voitiin todeta, että hakkuukoneaineistoa voidaan käyttää kaukokartoituksen referenssiaineistona. Tällöin on suositeltavaa käyttää hakkuukoneen kouran sijaintia ja pienintä koelakokoa 254 m², koska tämä on jo nykyisin kaukokartoituksessa käytetty koelakoko. Mikäli käytettävissä on vain hakkuukoneen sijainti, on koelakokoa kasvatettava 761 neliometriin, jolloin saavutetaan sama tarkkuus kuin kouran sijaintia ja pientä koelakokoa käytettäessä. Suurempi koela tasoittaa yksittäisen puun sijainnin epätarkkuudesta johtuvaa virhettä.

Puun paikannustarkkuus on yksittäisenä tekijänä merkittävin hakkuukoneaineiston käyttökelpoisuuteen kaukokartoituspohjaisen puustotulkinnan opetusaineistona vaikuttava tekijä. Tästä johtuen Arbonaut Oy:n ja Metsäteho Oy:n yhteistyönä selvitettiin vielä simuloimalla paranneltun hakkuukoneen sijaintitiedon hyödyntämistä kaukokartoitukseen perustuvan metsäinventoinnin opetusaineistona.

Tässä jatkotutkimuksessa puiden sijainnit perustuivat hakkuukoneen tallentamiin satelliittipaikannettuihin hakkuukoneen sijainteihin, joita korjattiin simuloimalla puiden sijainnit koneen etusektorille, ajourien ympärille. Simulointi tehtiin käyttäen tietoja hakkuukoneen mallista ja toteutuneista kouran suunnan ja etäisyyden jakaumista. Muilta osin koejärjestely ja laskentamenetelmät olivat aiemmin kuvatun mukaiset (kuva 4).



Kuva 4. Hakkuukoneen sijainti tallennettuna jokaiselle puulle puun kaatohtokellä ja simuloimalla korjatut puiden sijainnit. Simulointi tehtiin käyttäen tietoja hakkuukoneen mallista ja toteutuneista kouran suunnan ja etäisyyden jakaumista. Ilmakuvat: copyright Maanmittauslaitos.

Tutkimustulosten mukaan simuloitu puiden sijaintitieto tarkentaa kuviokohtaisten puustotunnusten estimointia päätehakkuukohteilla. Puustotunnusten estimointitarkkuus parani keskimäärin 1–2 prosenttiyksikköä (RMSE), kun mallinnusaineistoon lisättiin hakkuukoneella mitattuja koealoja. Simuloitujen sijaintien käyttö pienensi keskivirhettä edelleen noin prosenttiyksikön. Sijaintitarkkuus vaikuttaa erityisesti puulajeittaisten tunnusten ja jakaumien estimointitarkkuuksiin. Laskennallisesti simuloimalla parannetun hakkuukoneen puukohtaisen sijaintitiedon käyttö parantaa merkittävästi aineiston käytettävyyttä kaukokartoituksen opetusaineistona. Puukohtaisia sijainteja on kuitenkin joko korjattava laskennallisesti, tai yksittäisen puun paikannustarkkuutta on muutoin parannettava, jotta hakkuukoneaineisto olisi käyttökelpoista opetusaineistona.

Mikäli puukohtaista sijaintitarkkaa hakkuukoneiden keräämää aineistoa olisi saatavilla suuria määriä ja se voitaisiin yhdistää leimikon perustietoihin, voitaisiin mallinnuksessa normaalien laser- ja ilmakuvapiirteiden ohella hyödyntää muita kasvupaikkaa kuvaavia tietoja. Tulevaisuudessa käytössä voi olla hakkuun yhteydessä tuotettu puukartta poistetusta tai jäljelle jäävästä puustosta, mikä luo mahdollisuuksia hakkuukoneella kerätyn tiedon laajamittaisemmalle käytölle myös muissa kuin päätehakkuukäisissä metsissä. Menetelmää tulisi jatkossa testata laajemmalla aineistolla etenkin, jos käytettävissä olisi joko hakkuukoneen kouran sijaintitieto avohakkuulta poistettujen puiden osalta tai muulla tavoin tuotettu puukartta joko jäljelle jäävästä puustosta tai hakkuuta edeltäneestä tilanteesta. Puukarttatieto mahdollistaisi menetelmän laajentamisen ja opetuskoalojen muodostamisen myös harvennusleimikoihin. Puun sijaintitiedon parantumisen myötä hakkuukonekoalojen käyttöä voidaan todennäköisesti tehostaa nykyisestä merkittävästi, mikä voi edelleen parantaa päätehakkuukohteiden puustotulkinnan tarkkuutta ja mahdollistaa esimerkiksi tarkkojen runkolukusarjojen ennustamisen. Laserkeilaukseen perustuvassa puustotulkinnassa optimaalinen hakkuukonekoalan koko riippuu hakkuukoneessa käytetystä puiden paikannusmenetelmästä. Hakkuulaitteen paikannus tai puiden sijaintien simulointi tarkentaa koelan puustotunnusten määrittämisen luotettavuutta ja mahdollistaa pienempien koalojen käyttämisen kuin ilman hakkuulaitteen paikannusta.

Hakkuukonetiedon käyttöä satelliittikuvatulkinnassa selvitettiin VTT:n, Helsingin yliopiston, Arbonaut Oy:n ja Metsäteho Oy:n yhteistyönä. Satelliittikuviin perustuvassa puustotulkinnassa ei

hakkuukoneaineiston lisäämisellä Sentinel-2 -kuvilla tehtävään puustotunnusten mallintamiseen saavutettu merkittävää parannusta verrattuna pelkän maastokoeala-aineiston avulla saavutetuihin tuloksiin. Satelliittikuviin perustuvassa puustotulkinnassa puustotunnukset ennustetaan koealatasolla n. 10 %-yksikköä tarkemmin Sentinel-2 -satelliittikuvapiirteiden avulla verrattuna vastaavaan Landsat-8 -ennusteeseen.

Hakkuukoneen tuottamaa aineistoa on mahdollista käyttää satelliittikaukokartoituksen yhteydessä muun referenssiaineiston lisänä. Hakkuukoneista systemaattisesti kerätyn tiedon etuna voidaan pitää sen ajantasaisuutta ja puustotiedon tarkkuutta. Estimaattien tarkkuuden voidaankin olettaa paranevan, kun hakkuukonetiedon sijaintitarkkuutta parannetaan. Aineiston tehokas hyödyntäminen vaatii kuitenkin sen laadun merkittävää parantamista, kuten virheellisten lähtötietojen ja mallinnukseen kelpaamattomien kuvioiden poistamista. Hakkuukonekoealojen hyödyntäminen muiden kuin päätehakuupuustojen estimoinnin apuaineistona vaatisi teknisiä edistysaskelia myös jäljelle jääneen puuston automaattisessa hakkuunaikaisessa mittaamisessa. Tästä syystä hakkuukoneaineisto ei sovellu yksinään referenssiaineistoksi vielä tässä vaiheessa, koska nuorien metsiköiden opetusaineisto on tuotettava muista lähteistä.

Yhteenvetona voidaan todeta, että hakkuukonetietoa uudistuskypsistä metsistä voidaan hyödyntää laserkeilaukseen ja satelliittikuviin perustuvassa aluepohjaisessa puustotulkinnassa. Hakkuukonetiedolla on mahdollista saavuttaa laserkeilaukseen perustuvassa puustotulkinnassa vähintään vastaava tarkkuustaso kuin laajan maastokoeala-aineiston käytöllä uudistuskypsissä metsissä – kouran sijaintiin perustuvalla ja simuloitulla puukohtaisella tiedolla jopa parempi tarkkuustaso. Lisäksi hakkuukonetiedon avulla on saavutettavissa kustannussäästöjä, mikäli osa maastossa mitattavista koealoista voidaan korvata hakkuukonetietoon perustuvilla koealoilla. Hakkuukonetietoon perustuvan puustotulkinnan tarkkuutta on mahdollista parantaa tarkentamalla hakattujen puiden sijainnin määrittystä esim. parantamalla hakkuukoneen paikannustarkkuutta ja hyödyntämällä laajemmin hakkuulaitteen sijaintitietoa puustotietojen määrittämisessä koealoille.

Kirjallisuutta

- Hämäläinen J., Räsänen T., Riekkö K., Sorsa J.-A., Ritala R. (2019). Metsätiedon palvelualustan konseptitestaus. Metsätehon raportti 252. <http://www.metsateho.fi/metsatiedon-palvelualustan-konseptitestaus-raportti/>.
- Melkas T., Riekkö K., Sorsa J.-A. (2018.) Automaattinen toimenpidekuvion rajojen muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 7a/2018. <http://www.metsateho.fi/automaattinen-toimenpidekuvion-rajojen-muodostus-hakkuukoneen-sijaintitietoon-perustuen/>.
- Peuhkurinen J., Sirparanta S., Melkas T., Riekkö K. (2019). Hakkuukonetiedosta simuloitujen puun sijainnit kaukokartoituksen opetusaineistona. Metsätehon tulosalvosarja 5/2019. <http://www.metsateho.fi/hakkuukonetiedosta-simuloitujen-puun-sijainnit-kaukokartoituksen-opetusaineistona/>.
- Riekkö K., Melkas T., Ovaskainen H., Poikela A., Sorsa J.-A. (2018). Ajourien automaattinen tuottaminen ja ajouratunnusten määrittäminen hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 4/2019. <http://www.metsateho.fi/ajourien-automaattinen-tuottaminen/>.
- Saukkola A., Melkas T., Riekkö K., Sirparanta S., Peuhkurinen J., Hyyppä J., Vastaranta M. (2019). Predicting forest inventory attributes using airborne laser scanning, aerial imagery, and harvester data. *Remote Sensing* 11(7): 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs11070797>.