

Loppuraportti VMI I Tehostaminen

Annika Kangas, András Balázs, Helena Haakana, Markus Haakana, Helena Henttonen, Juha Heikkinen, Antti Ihalainen, Matti Katila, Kari T. Korhonen, Mikko Kuronen, Mari Myllymäki, Kai Mäkisara, Juho Pitkänen, Timo P. Pitkänen, Jouni Peräsaari, Minna Rätty, Sakari Tuominen

Tiivistelmä

Hankkeen tavoitteena oli parantaa VMI:n tehokkuutta kaukokartoitustiedon avulla. Kaukokartoitusmenetelmiä testattiin puiden mittaamiseen koealalla (maalaserkeilaus, digikamerat, optinen dendrometri), VMI:n tulosten laskentaan (jälkiositus ja malli-avusteinen päättely), koealarypäiden valintaan ja niiden kokoon (tasapainoinen otanta), sekä monilähdekarttatulosten tuottamiseen (fotogrammetrinen ja lidar-aineisto). Puumittauksissa maalaserkeilaus soveltuu hyvin tutkimusaineiston hankintaan, mutta kalleutensa, mittaustarkkuutensa ja hitautensa takia se ei sovellu operatiiviseen työhön. Myöskään muut testatut laitteet eivät olleet riittävän tarkkoja VMI:n operatiiviseen työhön. Sekä jälkiosituksella että malli-avusteisella päättelyllä inventointituloksien luotettavuutta pystyttiin selvästi parantamaan, ja menetelmistä jälkiositus otettiin yksinkertaisempaan VMI:n operatiiviseen käyttöön. Otannan tasapainotuksella pystyttiin myös tehostamaan otantaa jonkin verran. Koska saavutetut hyödyt systemaattiseen otantaan verrattuna olivat melko pienet (<20%), ja pysyvistä koealoista jouduttaisiin siirtymään 2-3 kertaa mitattaviin puolipysyviin koealoihin, tasapainotus otettiin käyttöön vain Ahvenanmaalla. Siellä myös lohkokoko optimoitiin tasapainotuksen yhteydessä. Fotogrammetrisella 3D aineistolla päästään selvästi luotettavampiin tuloksiin kuin satelliittikuviin perustuvalla menetelmällä. Normaali metsäkuvauksissa käytetty resoluutio ja stereopeitto osoittautuivat riittäviksi. Lisäksi testattiin tulosten luotettavuuden parantamista monen ajankohdan aineistojen avulla. Prioritiedon käyttö näyttää jonkin verran tehostavan inventointia, mutta operatiiviseen käyttöön ottaminen vaatii vielä lisätutkimuksia.

1. Tutkimuksen tavoitteet

Tavoitteena oli uuden sukupolven inventointi, jossa kaukokartoituksen tuoma kehityspotentiaali on täysimääräisesti otettu käyttöön. Hankkeessa kehitettiin menetelmiä eri kaukokartoitusaineistojen yhdistämiseksi VMI:n tulosten laskentaan esimerkiksi jälkiosituksen ja malli-avusteisen päättelyn kautta (TP1). Tavoitteena oli parantaa erityisesti pienalue-estimoinnin menetelmiä. Kaukokartoitusmateriaaleja ja pienalue-estimointia käyttäen voidaan parantaa myös maankäytön muutosten ja vuotuisten poistumien estimointia. Tavoitteena oli myös testata voidaanko uusilla kaukokartoitusmateriaaleilla, kuten fotogrammetrisilla pistepilviaineistoilla, kustannustehokkaasti parantaa monilähdeinventoinnin tuloksia. Tavoitteena oli myös parantaa maastoinventoinnin kustannustehokkuutta designia ja klusterien sekä koealojen kokoa optimoimalla (TP2). Testasimme myös uusien, kaukokartoitukseen perustuvien koealarypäiden valintamenetelmien tehokkuutta otannassa. Lisäksi testasimme onko mahdollista nykyisellä laskentatekniikalla korvata / täydentää VMI koealamittauksia uusilla mittalaitteilla kuten

digikameroilla tai maalaserilla (TP3). Tällainen aineisto voisi mahdollistaa esimerkiksi puuston laadun tarkemman mallintamisen metsäteollisuuden tarpeisiin.

2. Tutkimusosapuolet ja yhteistyö

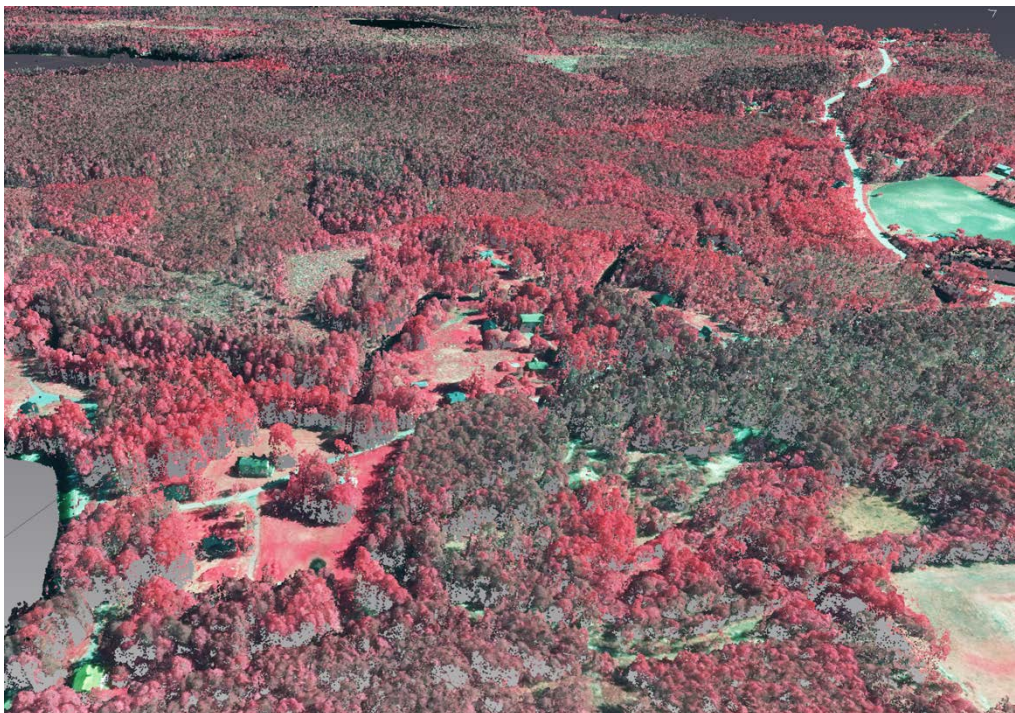
Hanke on toteutettu kokonaan Luken sisäisenä työnä.

3. Tutkimuksen tulokset

3.1 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

3.1.1 Kaukokartoitusaineistot

Hankkeen pääasialliseksi testialueeksi valittiin UVMi hankkeen (Valtakunnan metsien inventoinnin ja Suomen metsäkeskuksen metsävaratietojen keruun yhdistäminen – menetelmätutkimus) testialue Ähtäri-Virrat alueelle. Alueelta oli käytettävissä UVMi-hankkeen maastokoealat (Tomppo ym 2014), Landsat 8 satelliittikuva, sekä ortoilmakuva- ja lidar-aineistot. Vuodelta 2013 peräisin olevista ortokuvamosaiikkia varten tuotetusta ilmakuva-aineistoista muodostettiin hankkeessa stereofotogrammetrinen 3D ilmakuvapistepilviaineisto. Alueelta on mitattu noin 2400 koealan testiaineisto.



Kuva 1. Ote stereofotogrammetrisestä latvusmallista vuodelta 2017. Aineisto yhdistää 3D-tiedon ja väärävärikuvan sävyt (jotka on siirretty latvusmallin 3D-pisteille)

Kesällä 2017 tehtiin uusi ilmakuvauus, joka kattoi osan alkuperäisestä UVMi-testialueesta. Sen kuvausparametrit räätälöitiin aiempaa paremmin fotogrammetristä 3D-latvusmallin (ks.

kuva 1) tuottamista varten. Tämä tarkoitti parempaa resoluutiota ja suurempaa stereopeittoa. Tällä alueella tehdyt koealamittaukset vuoden 2013 kuvauksista päivitettiin maastossa. Samassa yhteydessä ilmakehän kuvauksien rinnalla on testattu lisäksi uutta ESA:n Sentinel 2 - kaukokartoitus satelliitin kuvaa, joka on myös hankittu tutkimusalueelta vuoden 2017 kesästä.

Pienempänä testialueena kokeellisempien kaukokartoitusmenetelmien testaamiseen on käytetty Evon opetusmetsäaluetta ja sen lähettävillä olevia muita valtionmetsiä. Tällä alueella on tutkittu eritoten kaukokartoitukseen perustuvien puustotulkintamenetelmien edelleen kehittämistä monipuolisen kaukokartoitusaineiston pohjalta. Alueella on kesällä 2018 tehty laserkeilaus ja hyperspektrikuvaus lentokoneesta, sekä dronekuvauksia yhdessä SYKEN kanssa. Kaukokartoituksen referenssiaineistoksi on alueelta mitattu edustava 300 koealan maastoaineisto. Aineistoa käytetään metsätunnusten tulkintamenetelmien testaamiseen ja kehittämiseen, mukaan luettuna uudet tekoälyyn ja koneoppimiseen perustuvat menetelmät.

Eri kaukokartoitusaineistojen lisäksi hankkeessa on selvitetty eri luokittelijoiden ja piirrevalintamenetelmien käyttökelpoisuutta metsällisessä puustotulkinnassa, koska käytetyt kaukokartoitusaineistot ovat perinteiseen kuvantulkintaan verrattuna piirteiltään monimutkaisempia ja tietosisällöltään erilaisia.

3.1.2 Simuloidut aineistot

Jälkiosituksen ja malliavusteisen päättelyn vertaamiseen sekä prioritetiedon tuottaman tehokkuusedun arvioimiseen käytettiin VMI-aineistojen lisäksi simuloitua aineistoa. Simuloitu aineisto perustui Vålerista Norjasta kerättyyn alkuperäiseen koeala-aineistoon. Simulointia varten mallinnettiin ensin kunkin aineiston muuttujan jakaumat. Tämän jälkeen mallinnettiin pareittain muuttujien väliset riippuvuudet ns. copuloilla, joista marginaalijakauman vaikutus on eliminoitu. Näiden avulla simuloitiin aineisto, jossa voitiin testata erilaisia menetelmiä siten, että populaation todelliset arvot oletetaan tunnetuiksi.

3.1.3 VMI aineistot

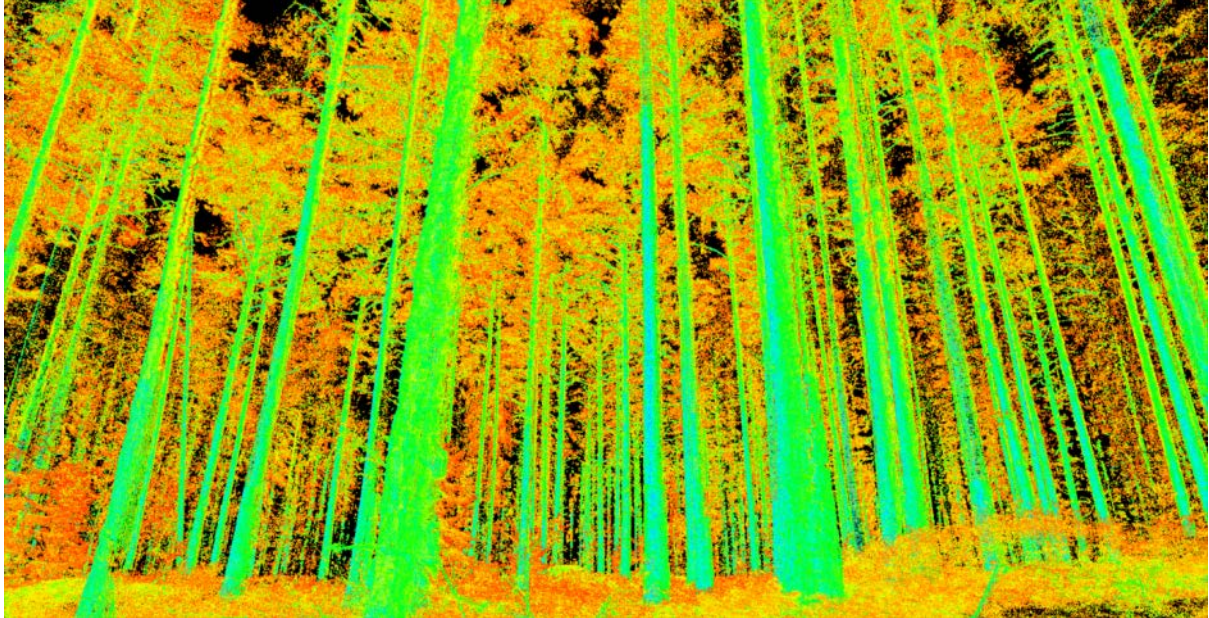
Ositus- ja jälkiositusmenetelmien sekä tasapainoisen otannan testeihin käytettiin olemassa olevia VMI11-koealoja sekä VMI10-koealoihin perustuvia monilähdeinventoinnin kartoja koko Suomen alueelta. Lisäksi yhteen testiin käytettiin Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoja.

Maankäytön muutoksille testattiin jälkiositusta metsäkadon osalta kahdella testialueella, jotka olivat Helsingin ja Oulun seuduilla. Testialueet olivat kooltaan 28 000 ja 30 000 km². Tutkimuksessa käytettiin VMI11 ja VMI12 koealoja sekä MVMI-teemakarttoja ja CORINE-maanpeitetasoja kahdelta ajankohdalta maaluokkamuutuskartan tuottamiseen ositusta varten. Helsingin seudun testialueella kokeiltiin myös VMI:n maaluokkamuutostietojen tarkentamista paikkatietoaineistoilla ennen jälkiositusta.

3.1.4. Puumittausaineistot

Hankkeessa mitattiin vuonna 2016 Lapinjärvellä 18 erittäin suurta ympyräkoelaa (säde 20 metriä) erilaisista metsistä. Testissä mitattiin puiden yläläpimittoja ja läpimittoja perinteisten laitteiden (latvakaulain, mittasakset) lisäksi Criterion plus -optisella dendrometrillä. Lisäksi puumittauksia hyödynnettiin projektin aikana hankitun maalaserkeilaimen testaamiseen ja sopivien keilausparametrien haarukointiin myöhempää ja laaja-alaisempaa aineistonkeruuta varten.

Keilaukset tehtiin viidestä asemapistestä siten että yksi keilaus suoritettiin keskeltä ja loput neljä pääilmansuunnissa noin yhdeksän metrin etäisyydeltä keskipisteestä. Keilausten ensisijaisena tarkoituksena oli tunnistaa puut 9 m säteellä sekä testata keilausaineiston kelpoisuutta niiden läpimittojen mittaukseen.

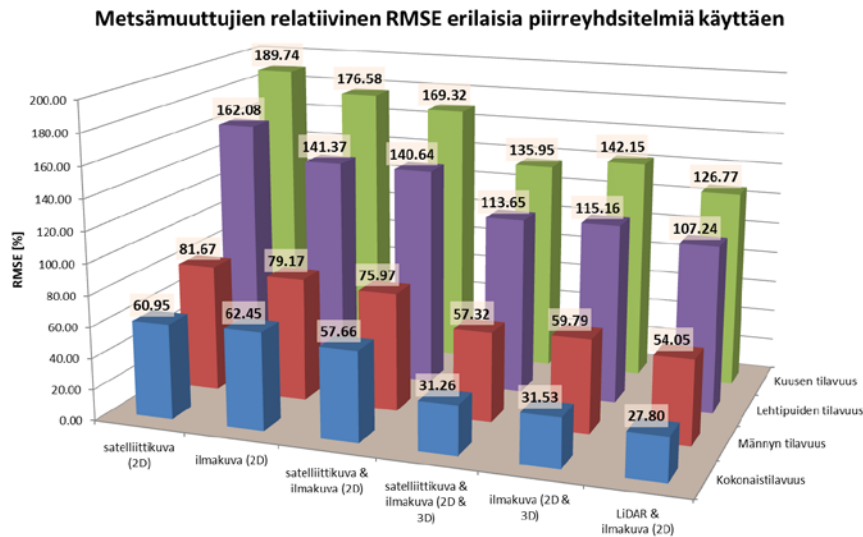


Kuva 2. Varttunutta männikköä Lapinjärven koealueelta maalaserkeilaimella nähtynä. Kuvan värit liittyvät heijastuneiden säteiden intensiteettiin eli signaalien palautumisvoimakkuuteen.

3.2 Tutkimustulokset

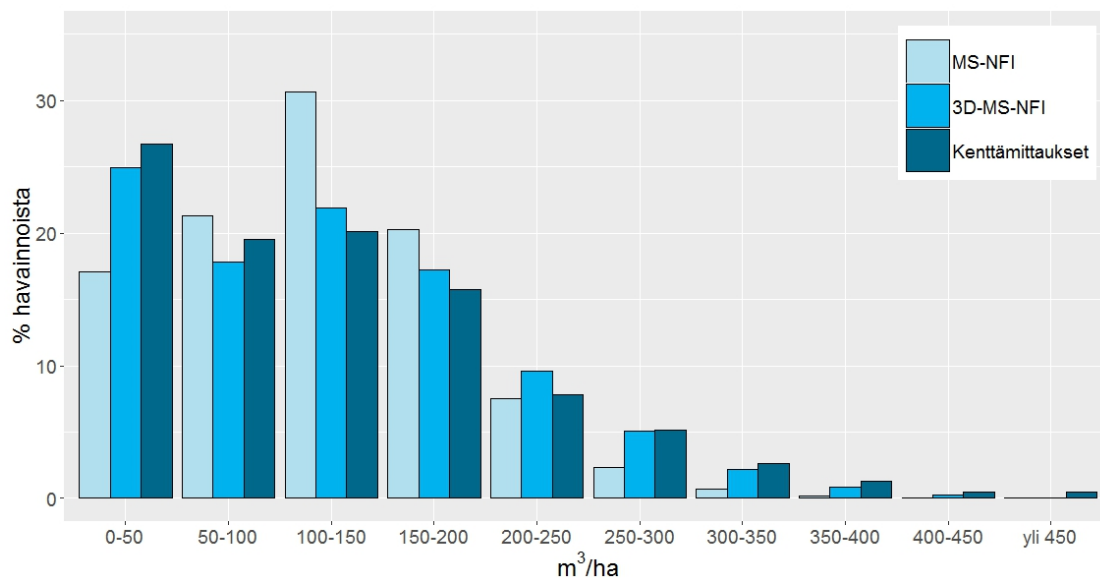
3.2.1 Kaukokartoitusaineistoilla tuotettu metsävaratieto

Eri kaukokartoitusaineistolla tuotettujen metsävaratietojen luotettavuudesta saatujen tulosten perusteella ilmakuvapistepilviaineisto on luotettavuudeltaan hyvin lähellä laserkeilausta (Tuominen ym. 2017). Voidaan myös todeta, että traditionaaliseen (2D-) kuvantulkintaan perustuvan kaukokartoituksen tarkkuutta ei juurikaan pystytä parantamaan esim. kuvien resoluutiota lisäämällä, vaan kertaluokan parannus tarkkuudessa edellyttää 3D-aineistojen käyttämistä (lidar tai fotogrammetrinen). Näiden aineistojen välillä erot olivat sinänsä melko pienet (Kuva 3).



Kuva 3. 2-ulotteisten ja 3-ulotteisten aineistojen luotettavuus tilavuustunnusten arvioinnissa.

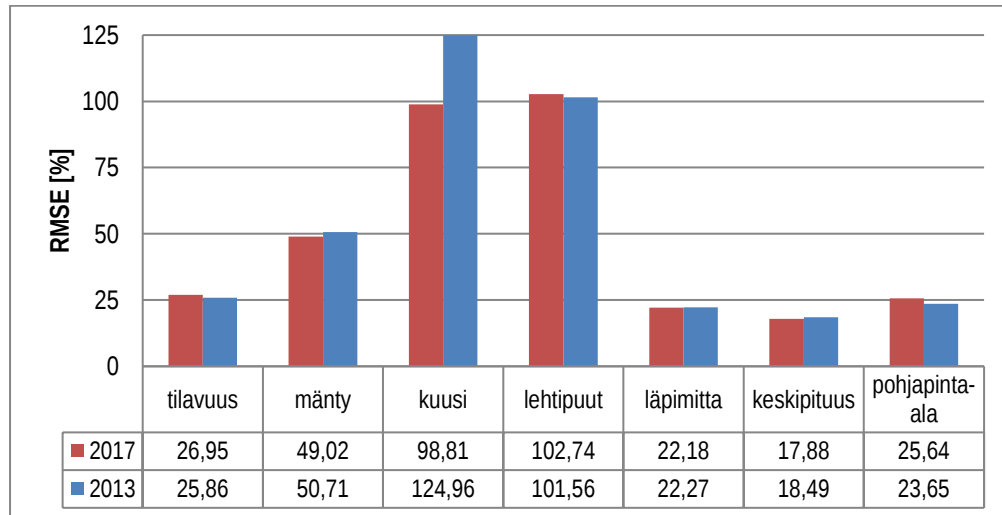
Lisäksi voitiin todeta, että stereofotogrammetrisen 3D-aineiston käyttö vähentää merkittävästi perinteisen kuvantulkintaan perustuvan kaukokartoituksen keskiarvoistumisongelmaa. Puustotunnusten keskiarvoistumisen takia esim. monilähde-VMI-aineistossa suuret puustot tulevat aliarvioituiksi, mikä on ollut merkittävä haitta aineiston käytölle esim. potentiaalisten leimikoiden haussa. 3D-aineistoa käytettäessä puustoestimaattien jakauma on 2D-kuvantulkintaan verrattuna merkittävästi lähempänä maastossa mitattua empiiristä jakaumaa (Kuva 4).



Kuva 4. Perinteisen satelliittikuvantulkintaan perustuvan monilähdeinventoinnin (MS-NFI) ja 3D-ilmakuvadataa hyödyntävän inventoinnin (3D-MS-NFI) tuottama puuston tilavuusjakauma (referenssinä kenttämittaukset)

Tarkemmalla resoluutiolla hankitusta uudesta ilmakuvapistepilviaineistosta tehtiin uudet laskelmat. Niissä verrattiin vuoden 2013 ja 2017 kuvausaineistoja siten, että kumpaakin aineistoa verrattiin saman ajankohdan koelamittauksiin. Tarkoituksena oli testata, saadanko tällä ilmakuvauksella sellaista lisähyötyä, että tarkempaan resoluutioon ja suurempaan

stereopeittoon investoiminen olisi perusteltua. Tulokset osoittivat, että tarkempi resoluutio ei tuo sellaista hyötyä, että 3D aineiston tuottamiseen olisi järkevää käyttää perinteisen kuvausresoluution asemesta tarkempaa resoluutiota (Tuominen ym. 2019, käsikirjoitus, Kuva 5). Perinteinen aineisto oli kokonaistilavuuden suhteen jopa hieman luotettavampi, mutta tarkempi resoluutio mahdollisti hieman tarkemman puulajien erottelun, joka näkyy kuvassa kuusen tilavuuden pienempänä keskivirheenä vuoden 2017 aineistossa.



Kuva 5. Perinteisen (2013) ja tarkemman resoluution (2017) ilmakuvapistepilviaineistojen luotettavuus.

Testatuista kaukokartoitusaineiston metsätulkintamenetelmistä k:n lähimmän naapurin (k-nn) menetelmä todettiin toimivimmaksi, silloin kun sen yhteydessä käytetään sopivaa koneoppimisen menetelmää kuten geneettistä algoritmia valitsemaan parhaiten puustotunnuksia ennustavia piirteitä, samoin kuin muita k-nn menetelmän parametreja.

3.2.2 Jälkiositus ja malli-avusteinen päättely estimoinnissa

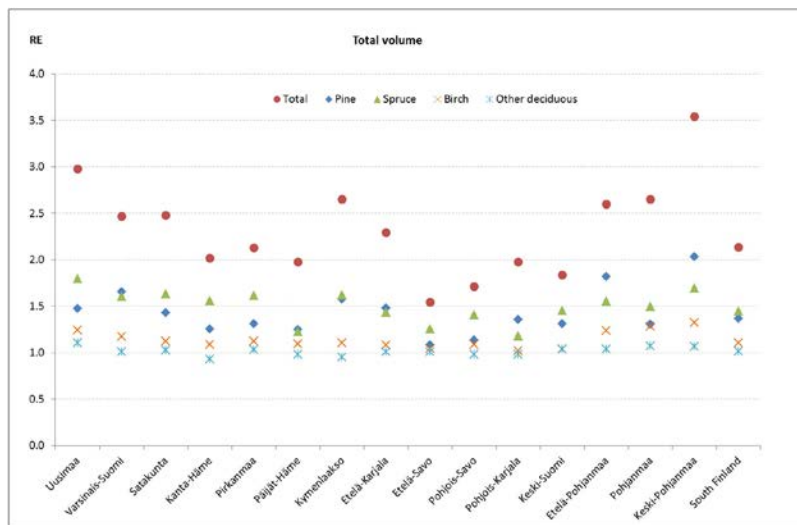
Jälkiosituksella tarkoitetaan menetelmää, jossa koealoja ei valita etukäteen ositteittain, mutta aineiston keruun jälkeen mitatut koealat ositetaan ja tulokset lasketaan vastaavalla tavalla kuin varsinaisessa ositetussa otannassa. Jälkiosituksen etuna normaaliin ositukseen on, että jälkiositus voidaan tehdä vain halutuille muuttujille, tai vaikka jokaiselle muuttujalle erikseen. Se vähentää riskiä siihen, että ositus heikentäisi tuloksia niiden muuttujien tuloksissa, joita ei käytetty osituksessa. Malliavusteinen estimointi tarkoittaa sitä, että laskennassa sovelletaan aputiedon ja kunkin tarkastellun muuttujan välistä regressiota. Perinteisestä regressioestimoinnista malli-avusteinen päättely eroaa siinä, että käytetty malli voi olla monimutkaisempi kuin regressioestimoinnissa on perinteisesti käytetty, esimerkiksi selittäviä muuttujia voi olla useita. Jälkiositus on tämän menetelmän erikoistapaus, jossa selittävänä muuttujana on ainoastaan tiettyyn ositteeseen kuulumista kuvaava indikaattori. Siten ennakkohypoteesi oli, että malliavusteinen menetelmä tuottaa enemmän tehokkuus-hyötyä kuin jälkiositus.

Aluksi testattiin jälkiosituksen ja malli-avusteisen päättelyn estimaattoreiden käyttökelpoisuutta simuloidussa aineistossa (Myllymäki et al. 2016). Testin perusteella jälkiosituksella voidaan saada likimain samantasoiset tulokset kuin malli-avusteisella päättelyllä, kun ositteiden määrä valitaan sopivasti. Lisäksi menetelmä on operatiivisen

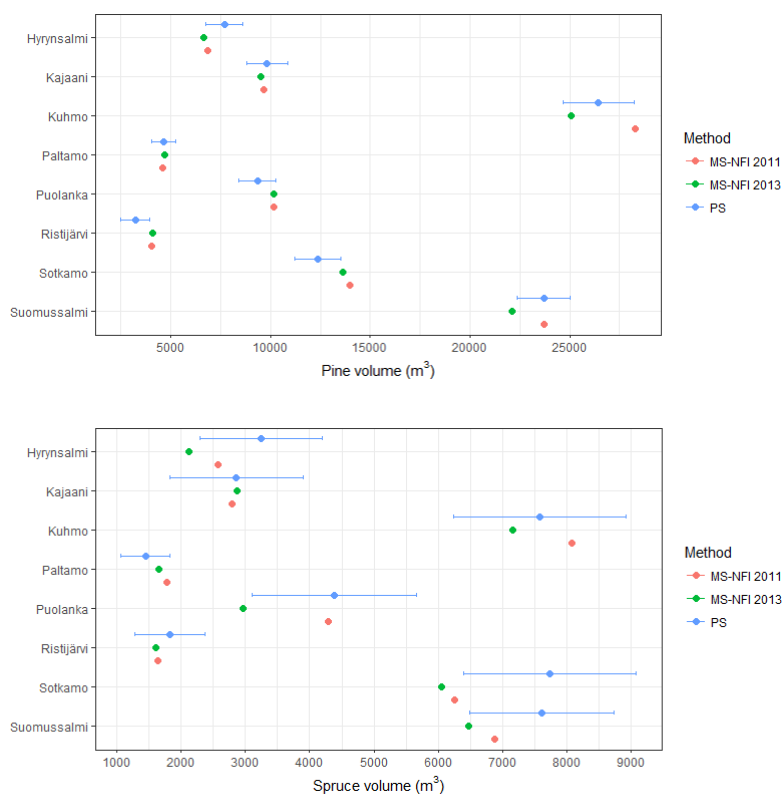
VMI:n näkökulmasta helpommin sovellettavissa kuin malli-avusteinen päättely: malli-avusteinen estimointi edellyttää, että kaikille tarkasteltaville muuttujille estimoidaan oma malli, mutta jälkiosituksessa on mahdollista soveltaa kaikille tunnuksille samaa ositusta. Testin tulosten perusteella tuotettiin koko Etelä-Suomen alueelle ensimmäiset testitulokset jälkiositusta soveltaen. Jälkiosituksessa käytettiin edellisen monilähdeinventoinnin tuottamaa (riippumatonta) metsävarakarttaa.

Jälkiositus osoittautui parantavan metsämaan pinta-alan ja eri puusto-ositteiden tilavuuksien tulosten luotettavuutta selvästi jo maakuntatasolla, vaikka maakuntatasolla myös maastokoealoja on runsaasti käytössä (Kuva 6, Haakana ym. 2019). Tuloksia vertailtiin suhteellisen tehokkuuden (relative efficiency = RE) perusteella. Se tarkoittaa, että menetelmän tehokkuutta verrataan tapaukseen, jossa ositusta ei käytetä. Tehokkuus >1 tarkoittaa, että ositus tuottaa paremman tuloksen, ja esimerkiksi RE 3 tarkoittaa että ilman ositusta samaan luotettavuuteen tarvitaan kolminkertainen määrä koealoja verrattuna jälkiositusmenetelmään.

Kokonaistilavuuden estimoinnissa jälkiositus oli yllättävänkin tehokas, eli RE oli jokaiselle maakunnalle vähintään 1,5, ja useimmissa selvästi yli 2. Jos VMI:n tavoitteena olisi vain puuston kokonaistilavuus, voitaisiin koealamäärää luotettavuuden kärsimättä merkittävästi vähentää. Ongelmana on se, että hiukankaan harvinaisempien kategorioiden (kuten koivun ja muiden lehtipuiden tilavuus), jälkiosituksella ei ollut mahdollista parantaa tulosten luotettavuutta (RE ~ 1). Koska tulokset olivat hyvät, eikä jälkiositus lisää kustannuksia (osituksessa käytetty monilähdeinventoinnin kartta on tehty aiemmin kuntatuloksien laskemista varten), menetelmä on otettu operatiiviseen käyttöön.



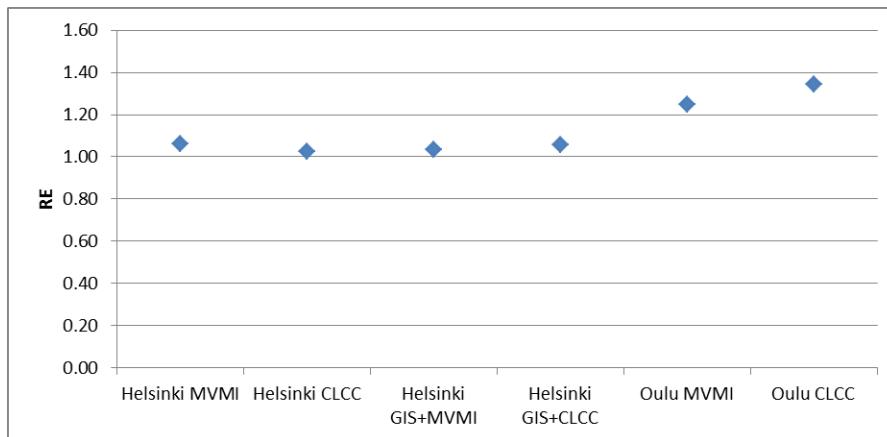
Kuva 6. Jälkiosituksen suhteellinen tehokkuus (RE) eri maakunnissa.



Kuva 7. Jälkiositukseen (PS) perustuvat kuntatulokset verrattuna monilähdeinventoinnin (MS-NFI) 2011 ja 2013 tuloksiin männylle (yllä) ja kuuselle (alla) Kainuussa. Vaakaviivat kuvaavat menetelmän luottamusväliä.

Jälkiosituksen käyttö mahdollistaa tulosten laskemisen luotettavasti aiempaa pienemmille alueille tai ositteille. Menetelmää testattiin Kainuussa ja Pirkanmaalla pienalueiden tasolla (Haakana ym. 2020). Jälkiositusta voidaan käyttää myös kuntatasolla suurimmissa kunnissa, ja kuntaryhmätasolla pienempien kuntien osalta. Tuloksia verrattiin monilähdeinventoinnin kuntatuloksiin, ja erityisesti puulajeittaisten tietojen osalta monilähdeinventoinnin tulokset poikkesivat monissa isoissakin kunnissa tilastollisesti merkitsevästi jälkiositustuloksista, eli monilähdeinventoinnin tulos ei mahtunut jälkiositustuloksen luottamusvälille (Kuva 7). Kokonaistilavuuden osalta menetelmien erot ovat pienemmät. Laskentapalvelussa (VMILaPa) jälkiositus on jo otettu operatiiviseen käyttöön myös kuntatulosten laskennassa.

Kasvihuonekaasujen inventaarioon liittyen tutkittiin maaluokkamuutospinta-alojen luotettavuuden parantamista jälkiosituksella. Tutkimuksessa keskityttiin metsäkadon pinta-aloihin, joiden keskivirheet pienenevät hieman jälkiosituksella alueesta ja aineistosta riippumatta (kuva 8). Koealatiedot ja osituksessa käytetyt aineistot kattoivat saman aikavälin, 2000 - 2009. MVMi:stä johdetut osituskartat pohjautuvat pääosin Maanmittauslaitoksen karttoihin ja metsäteeman osalta käytettiin segmentointia hakkuualueiden rajaukseen, joten osituskarttaa voi pitää riippumattomana. Oulun seudulla tulokset olivat huomattavasti lupaavampia, siellä yksittäiset metsäkatohavainnot olivat suuria-alueisemmilta kohteilta kuin Helsingin testialueella ja siten helpommin tunnistettavissa myös kaukokartoitusmateriaaleilla.

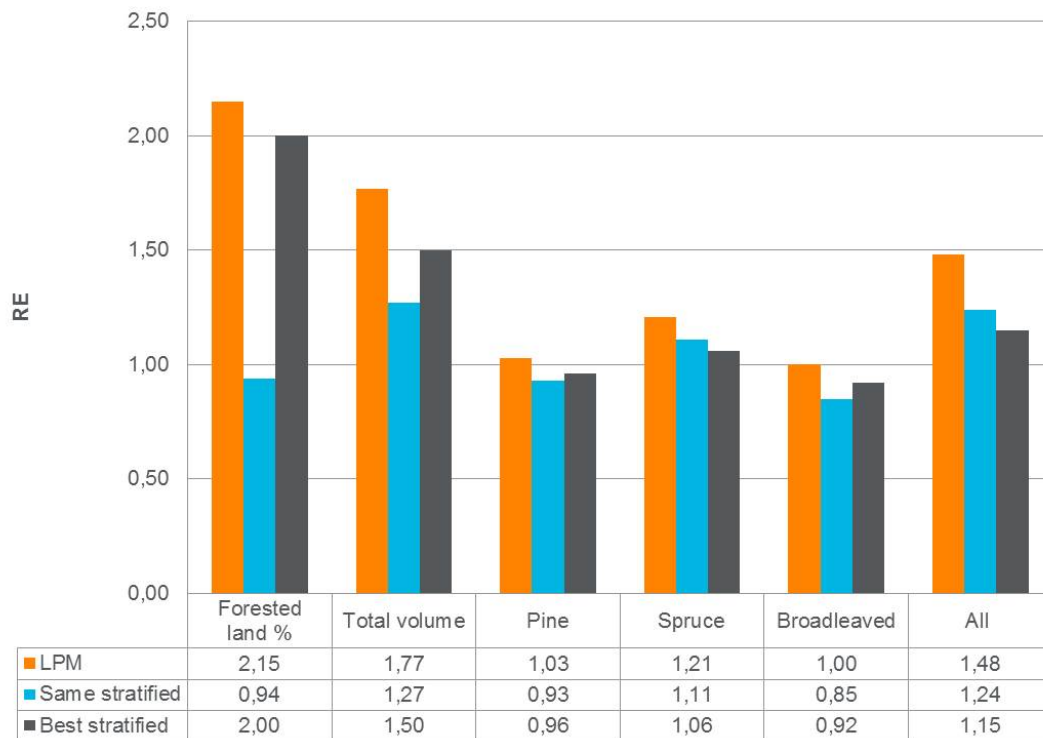


Kuva 8. Metsäkadon pinta-alaestimaattien suhteellinen tehokkuus (RE) jälkiosituksella MVMI:n ja CORINE:n muutostasoilla Helsingin ja Oulun seudun testialueilla. Helsingissä testattiin myös paikkatietoaineistoilla tarkennettua VMI-koeala-aineistoa jälkiositukseen.

3.2.3 Kaukokartoitustieto otannan designin tehostamisessa

Ruotsin VMI on siirtynyt kesällä 2018 alkaneessa VMI-kierroksessa systemaattisesta klusteriotannasta tasapainoiseen klusteriotantaan kertakoealoilla. Heidän ensimmäiset testituloksensa olivat erittäin hyviä, mutta näissä testeissä lisäinformaationa käytetty laserkeilauskartta ei ollut riippumaton inventointitiedoista, joten heidän saamansa tulokset ovat ylioptimistisia (Grafström ym. 2017). Siitä huolimatta, Ruotsin hyvien testitulosten seurauksena, myös Suomen VMI:ssä testattiin tasapainoista otantaa VMI11-aineistolla käyttäen lisäinformaationa VMI10-aineistosta tehtyä riippumatonta MVMI-karttaa. Alkuperäisen suunnitelman mukaan tavoitteena oli optimoida designia lohkojen kokoa ja koealojen kokoa säätelämällä. Koska potentiaaliset parannukset designin tehostamisessa olivat Ruotsissa saatujen tulosten perusteella merkittävät verrattuna koealojen koon ja lohkon koon optimointiin, pääosa työajasta keskitettiin designin optimointiin.

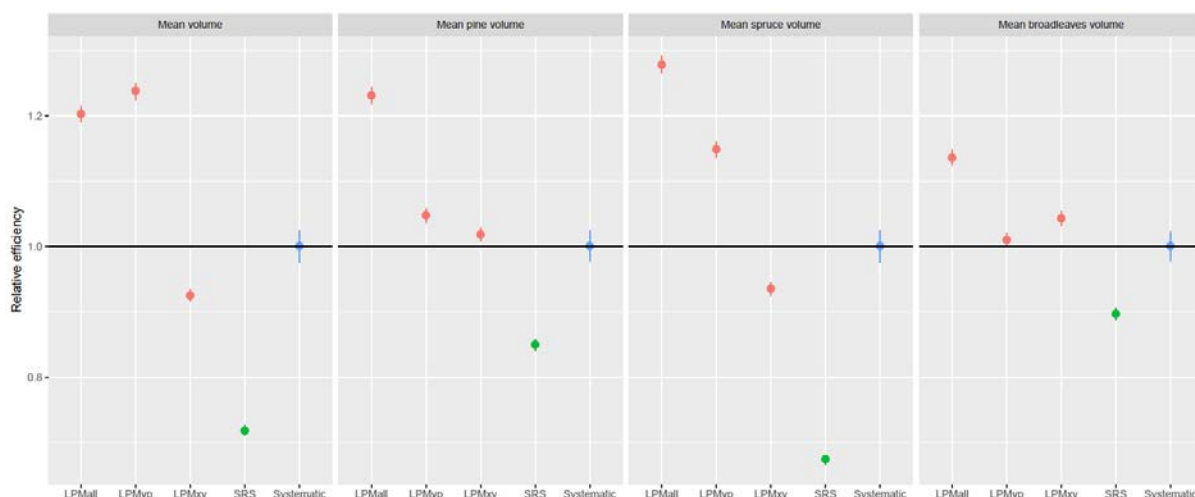
Simuloinneissa klusterin kokonaistilavuuden inventoinnin tehokkuus parani selvästi suhteessa satunnaiseen otantaan. Koska nykyisin käytössä oleva systemaattinen otanta on selvästi satunnaisotantaa tehokkaampi, simuloinnissa käytettiin vertailukohtana mahdollisimman lähellä systemaattista otantaa olevaa menetelmää, eli tasapainotettua otantaa, jossa tasapainotus tehdään vain koordinaattien perusteella. Kun tätä menetelmää käytettiin vertailukohtana, suhteellinen tehokkuus RE vaihteli välillä 1.00-2.15 muuttujasta riippuen (Kuva 9). Ositetulla otannalla on myös mahdollista päästä parempaan tehokkuuteen kuin koordinaattien suhteen tasapainotetulla otannalla, mutta tasapainoinen otanta on operatiivisessa käytössä selkeästi yksinkertaisempi kuin ositus (Räty ym. 2018). Lisäksi ositetulla otannalla tulokset erilaisten ositusten välillä ailahtelivat merkittävästi, joten myös tulosten heikkeneminen oli mahdollista. Esimerkiksi lehtipuun tilavuudessa tasapainotus tuotti heikkomman tuloksen kuin koordinaattien suhteen tasapainotettu otanta (RE 0.85-0.92).



Kuva 9. Monilähdekartan muuttujien avulla tasapainotettu (LPM) otanta, samoilla apumuuttujilla tehty ositus sekä paras löytynyt ositus verrattuna benchmark-menetelmänä käytettyyn koordinaattien suhteen tasapainotettuun otantaan.

Lisäksi hankkeessa testattiin LPM:n soveltamista tilanteessa, jossa osa koealoista on pysyviä. Menetelmän tehokkuus kärsii olennaisesti, kun pysyvien koealojen osuus kasvaa, koska niitä ei valita optimaalisella tavalla. Jos pysyviä koealoja on 60% kuten suomen VMI:ssä, LPM:n tuoma tehokkuusetu menetetään lähes kokonaan. Jos täysin pysyvien koealojen sijaan käytetään vain puolipysyviä, eli 2-3 kertaa mitattavia koealoja, LPM on edelleen käyttökelpoinen (Räty & Kangas 2019). Menetelmän käyttöönotto koko maassa siten edellyttäisi, että pysyvien koealojen käyttö suunnitellaan uudelleen. Toisaalta pitkille pysyvien koealojen aikasarjalle on käyttöä esimerkiksi metsien hoidon muutosten vaikutusten analysoinnissa. Tätä aikasarjaa ei kannata lopettaa pienen tehokkuusedun takia.

Viimeiseksi LPM:ää testattiin tilanteessa, jossa vanha MVMI-kartta oli aputietona ja uusi kartta toimi populaationa. Tässä testitilanteessa oli mahdollista simuloida otoksia, joissa rypäitä sijoittui lähemmäksi toisiaan kuin aiemmissa simuloinneissa, joissa populaationa toimivat aiemmin mitatut VMI-rypäät. Toisin sanoen, tässä testissä käytetty simulointitilanne oli aikaisempaa realistisempi. Se myös mahdollisti vertailun todelliseen systemaattiseen otantaan. Tässä testissä kävi ilmi, että 1) LPM tehostaa otantaa merkittävästi suhteessa satunnaiseen otantaan (kuten Ruotsissa tehdyissä testeissä), 2) LPM, joka on toteutettu pelkillä koordinaateilla (kuten Suomessa aiemmin tehdyt testit), oli melko lähellä systemaattista otantaa, ja 3) LPM suhteessa todelliseen systemaattiseen otantaan lähes poikkeuksetta tehosti otantaa, mutta saavutettu tehostuminen oli parhaimmillaankin vaatimatonta edellisiin tuloksiin nähden eli vaihteli välillä 1.0 – 1.2 (Kuva 10, Räty ym. 2019a Käsikirjoitus).



Kuva 10. LPM tehostaa otantaa paljon, kun vertailukohtana on yksinkertainen satunnaisotanta (vihreät pisteet). Sen sijaan, kun vertailukohtana on nykyinen systemaattinen otanta (siniset pisteet, y-akselin arvo 1) tai kun verrataan LPM:ään koordinaateilla (punaiset pisteet LPMxy-sarakkeella), tehokkuus on tarkasteltavilla apumuuttujilla vain hieman parempi.

LPM:ää testattiin myös käytännössä Ahvenanmaan vuoden 2018 VMI12-mittauksissa. Niitä varten LPM:illä optimoitiin ensin rypään koko ja sitten uudella ryväskeulla ja LPM:illä suoritettiin kertakoealojen valinta (Räty ym. 2019). Lopulliset tulokset Ahvenanmaan tuloksista lasketaan normaalisti VMI-hankkeessa, ja ne antavat osaltaan lisää tietoa menetelmän toimivuudesta käytännössä. Menetelmän käyttöönotto edellyttäisi myös uuden varianssiestimaattorin käyttöönottoa, sillä nyt käytössä oleva estimaattori soveltuu vain perinteiseen systemaattiseen otantaan. Erillinen testi tehtiin julkaistujen varianssiestimaattorien käyttökelpoisuudesta (Räty ym. 2019c. käsikirjoitus).

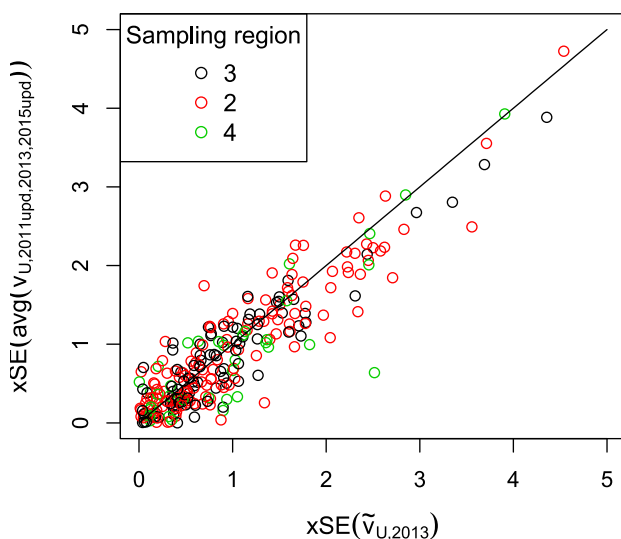
Simuloiduissa testeissä menetelmän tehokkuus ei osoittautunut yhtä hyväksi, kuin ensimmäiset testitulokset antoivat olettaa, eikä menetelmää lopulta otettu käyttöön manner-Suomen VMI13-inventoinnissa. Toisin sanoen, perinteinen systemaattinen otanta osoittautui odotuksia tehokkaammaksi. Selityksenä tässä lienee se, että riittävän suurella otoskeulla systemaattinen otanta tuottaa kaikkien muuttujien suhteen tasapainoisen otoksen.

LPM menetelmän tehokkuus voisi parantua, mikäli aputieto olisi laadultaan parempaa kuin MVMI-rasteritieto. Tämän vuoksi MVMI-kartan käyttöä otannan lisäinformaationa on verrattu myös laserkeilausaineistoon. Saatavissa oleva laserkeilausaineisto ei kuitenkaan tuottanut tehokkuushyötyä: vaikka laserkeilausaineisto tuotti keskitilavuuden suhteen parempia tuloksia kuin MVMI, MVMI-aineisto tuotti selvästi parempia tuloksia metsämaan osuuden suhteen, ja siten myös kokonaistilavuuden suhteen. Etenkin puulajikohtaisten tilavuuksien parantamisessa laserkeilausaputieto oli tehotonta (Räty ym. 2019b käsikirjoitus). Lisäksi jatkotutkimusta tehdään pysyvän ja kertaotoksen yhteensovittamisesta LPM:ssä, millä saatetaan pystyä vähentämään aiemmin havaittua otannan tehokkuuden laskua, kun osa otoksesta on kiinnitetty (eli pysyvä) (Kuronen ym. 2019 käsikirjoitus).

3.2.4 Vanhan inventointitiedon käyttö aputietona

Monilähteinen VMI (MVMI) tuottaa satelliittikuviin, karttatietoihin ja maastokoealoihin perustuen metsävaratietoja yksityiskohtaisina metsävarakarttoina ja kuntakohtaisina taulukkotietoina. Tietoja on tuotettu operatiivisesti jo 1990-luvun alusta. Viimeisimmät (kahdeksan) tulokset valmistuivat vuonna 2018 ja kuvaavat vuoden 2015 tilannetta. Peräkkäisissä kuntatuloksissa on havaittu osassa kunnista vaihtelua, jota ei voi selittää kasvun ja poistuman avulla (Katila & Heikkinen 2019 käsikirjoitus). Ensimmäisessä vaiheessa verrattiin MVMI-2013-kuntatulosten keskitilavuusestimaatteja yhteensä ja puulajeittain pelkkiin VMI-maastomittauksiin perustuviin tuloksiin ja niiden keskivirhe-estimaatteihin laajalla, lähes koko Suomen kattavalla alueella. Tilastollisesti merkitseviä virheitä havaittiin esim. puuston keskitilavuudella 10 % kunnista, mikä viittaa siihen, että MVMI-tuloksissa on systemaattista virhettä tältä osin. Tämän virheen korjaamiseksi kehitettiin useamman ajankohdan MVMI-kuntatuloksia yhdistämiseen datafuusiomenetelmä, joka käyttää pienalueille (kunnille) laskettuja VMI-koealojen painoja ja yleistettyä pienimmän neliösumman menetelmää.

Datafuusiomenetelmällä saadut parannukset kunnittaisten MVMI-estimaattien tarkkuudessa olivat pienehköjä, mutta samansuuntaisia. Pelkkä monen ajankohdan MVMI-kuntatulosten keskiarvo tarkensi tuloksia suunnilleen saman verran kuin kehitetty datafuusiomenetelmä (kuva 11).



Kuva 11. Kunnittaisten MVMI:n ja maasto-VMI:n keskitilavuuestimaattien (metsä- ja kitumaa) erotuksen itseisarvo skaalattuna maastoinventoinnin keskivirheeseen (xSE) ; MVMI-2013 (vaaka-akseli) vs. kolmen ajankohdan keskiarvo (MVMI-2011, MVMI-2013, MVMI-2015) tilavuuden kasvutrendillä päivitettynä, VMI-otanta-alueittain.

Kuva-alkion tasolla MVMI-karttojen ennustevirhe on suurehko, mutta pienenee alueen koon kasvaessa. Sen vuoksi oletettiin, että yhdistämällä temporaalisesti MVMI-karttoja voitaisiin pienentää ennustevirhettä jopa kuva-alkiotasolla. Tätä varten testattiin useamman ajankohdan MVMI-teemakarttojen (mvmi9 (1996-2003), -2005, -2007, -2009, -2011, -2013)

yhdistämistä maantieteellisesti kattavalla alueella luotettavamman kuva-alkiotason ennusteen saamiseksi erityisesti kasvupaikkamuuttujista (maaluokka, pääryhmä ja kasvupaikka). Näiden muuttujien voidaan olettaa pysyvän melko muuttumattomana metsien hakkuista riippumatta. Saatua MVMI-ennusteita validoitiin vertaamalla niitä VMI11-koealojen kasvupaikkatunnuksiin. Usean ajankohdan luokituksen moodia käyttäen saatiin selvää parannusta oikeinluokitustarkkuudessa vain 'kasvupaikka' –muuttujalle, noin 6 prosenttiyksikköä. Tosin alueellisia eroja oli havaittavissa ja esim. Ahvenanmaalla, missä on paljon kitu- ja joutomaita, maaluokkien erottelu parani. Samoin tarkasteltaessa kasvupaikan oikeinluokitusprosentteja kehitysluokissa usean ajankohdan ennusteen moodi paransi yhden ajankohdan kuvan heikoimmin luokitettujen kehitysluokkien, esimerkiksi aukeiden alojen, luokitusta.

Vastaavasti jatkuvilla muuttujilla kokeiltiin kuva-alkiokohtaisten ennusteiden yhdistämistä koealoilla, joissa ei ollut tapahtunut muutoksia (esim. hakkuita). MVMI-2009, -2011, -2013 ennusteista otettiin suoraan keskiarvo jota verrattiin VMI11 2011-2013 kertakoealojen, jotka olivat vähintään 20 m päässä metsikkökuvion rajasta, tilavuuksiin manner-Suomessa Lappia lukuun ottamatta. Yhdistelmäennusteissa esimerkiksi pohjapinta-alan suhteellinen keskivirhe (RMSE) pieneni 7 prosenttiyksikköä, 38 %:iin ja keskitilavuuden 9 prosenttiyksikköä, 58 %:iin.

Vanhan inventointitiedon käyttöä otannan tehostamiseen testattiin myös simulointitutkimuksessa (Kangas ym. 2019). Simuloinnin tulos on, että kaukokartoitukseen perustuvalla aputiedolla voidaan tuloksia parantaa enemmän kuin vanhalla inventointitiedolla, mutta tähän vaikuttaa käytettävissä olevan aputiedon korrelaatio maastotietojen kanssa, sekä vanhojen inventointitietojen päivityksen luotettavuus. Mitä luotettavammalla kasvumallilla on käytössä, sitä käyttökelpoisempaa myös vanhojen koealojen tuottama prioritieto on. Jatkotutkimuksissa täytyy selvittää, olisiko vanhoista koealoista saatavaa tietoa hyödyntää esimerkiksi harvinaisten ositteiden tai kategorioiden tulosten laskennassa.

3.2.5 Mittalaitteet inventoinnin tehostamisessa

Mittauksissa testattiin yläläpimitan mittaamisessa perinteistä kaulainta 5 metrin varrella, ja optista dendrometria. Testit osoittivat (Stenman 2019) että optinen Criterion plus laite ei laadultaan riitä yläläpimitan mittaamiseen VMI:ssä: yläläpimitan keskivirhe Päivisen ym. (1992) mukaan oli yläläpimittakaulaimella 7 cm, ja Criterionilla se oli laskentatavasta riippuen 7,07-10,36 cm.

Puutunnusten laskeminen maalaserkeilauksella tuotetusta pistepilviaineistosta aloitettiin testaamalla tähän mennessä eri maissa avoimina julkaistuja työkaluja (3D Forest, CompuTree, SimpleTree) ja Suomessa TTY:ssä kehitettyjä algoritmeja (Matlab-pohjainen sylinterimallinnus). Näistä lupaavimmaksi osoittautui kotimainen algoritmi, jonka kehittämistä jatkettiin hankkeen aikana TTY:n Pasi Raumosen kanssa. Algoritmin tuottamat tulokset pohjautuvat täysin automatisoituun prosessointiketjuun, jossa maalaserkeilaimen tuottamasta pistepilvestä erotetaan ensin yksittäiset puut ja tämän jälkeen mallinnetaan niiden pääarakenteet (runko ja oksien tyvet) pilveen sovitettujen sylinterien avulla.

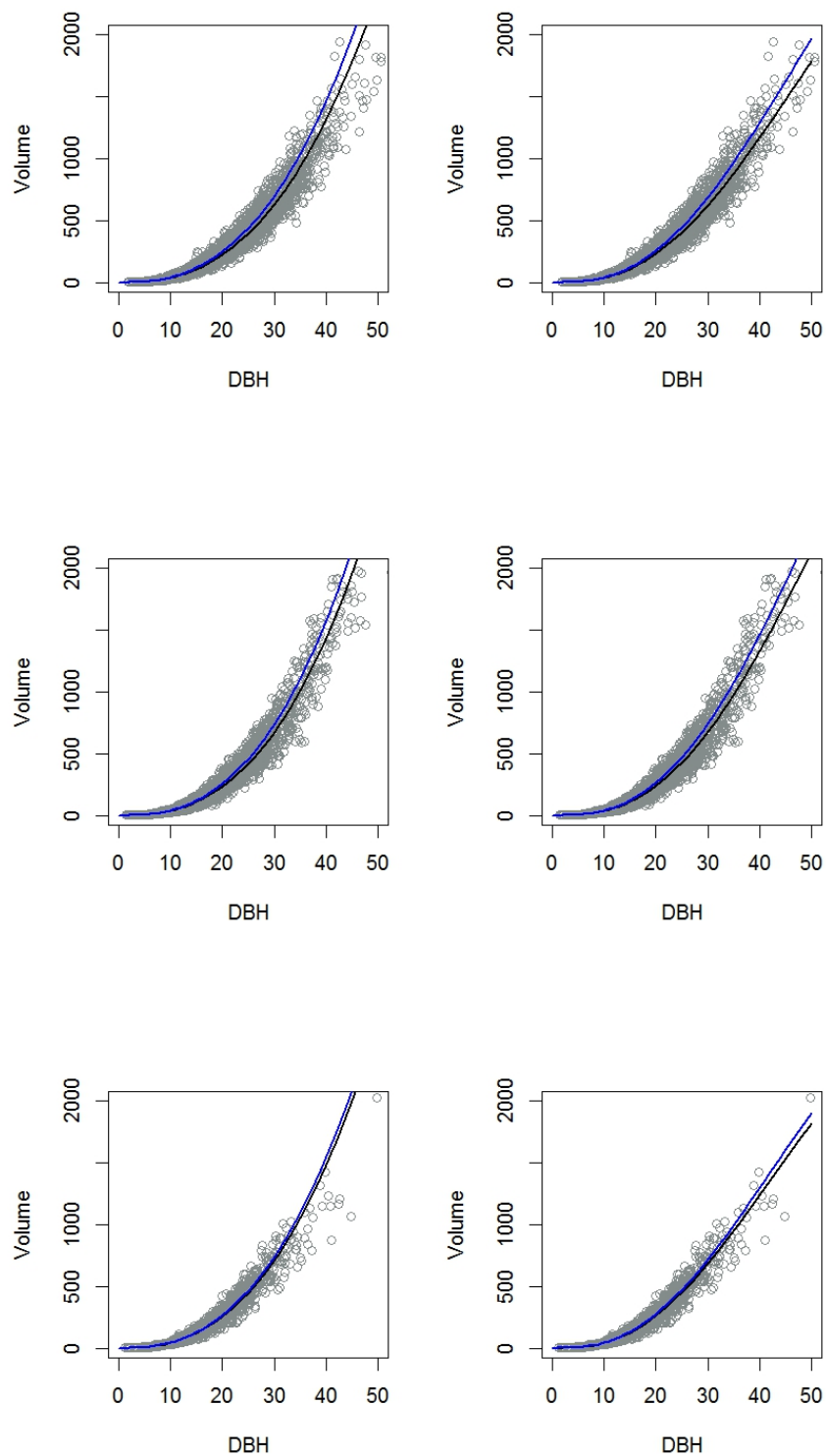
Oletuksena oli, että Raumosen algoritmin tuottamat tulokset olisivat käyttökelpoisia sellaisenaan, mutta tämä osoittautui vain rajoitetusti todeksi. Käytännössä sekä muiden puiden että puun omien oksien tuottamilla näkemäesteillä oli suuri merkitys sylinteri-

sovituksen laatuun, mikä korostui etenkin tiheämmissä metsissä ja runkojen yläosissa. Lisäksi tuulisuus vaikutti tuloksiin heikentämällä eri keilauksista yhdistettyjen rungonpuolikkaiden täsmäämistä toisiinsa. Sylinterisovituksen ongelmien lisäksi havaittiin, että pistepilvestä mallinnettu runko alkoi usein vasta jopa kymmeniä senttejä todellisen syntypisteen yläpuolelta ja päättyi selvästi ennen latvaa, aiheuttaen täten virheitä mallinnetun puun pituudelle ja rinnankorkeusläpimitalle.

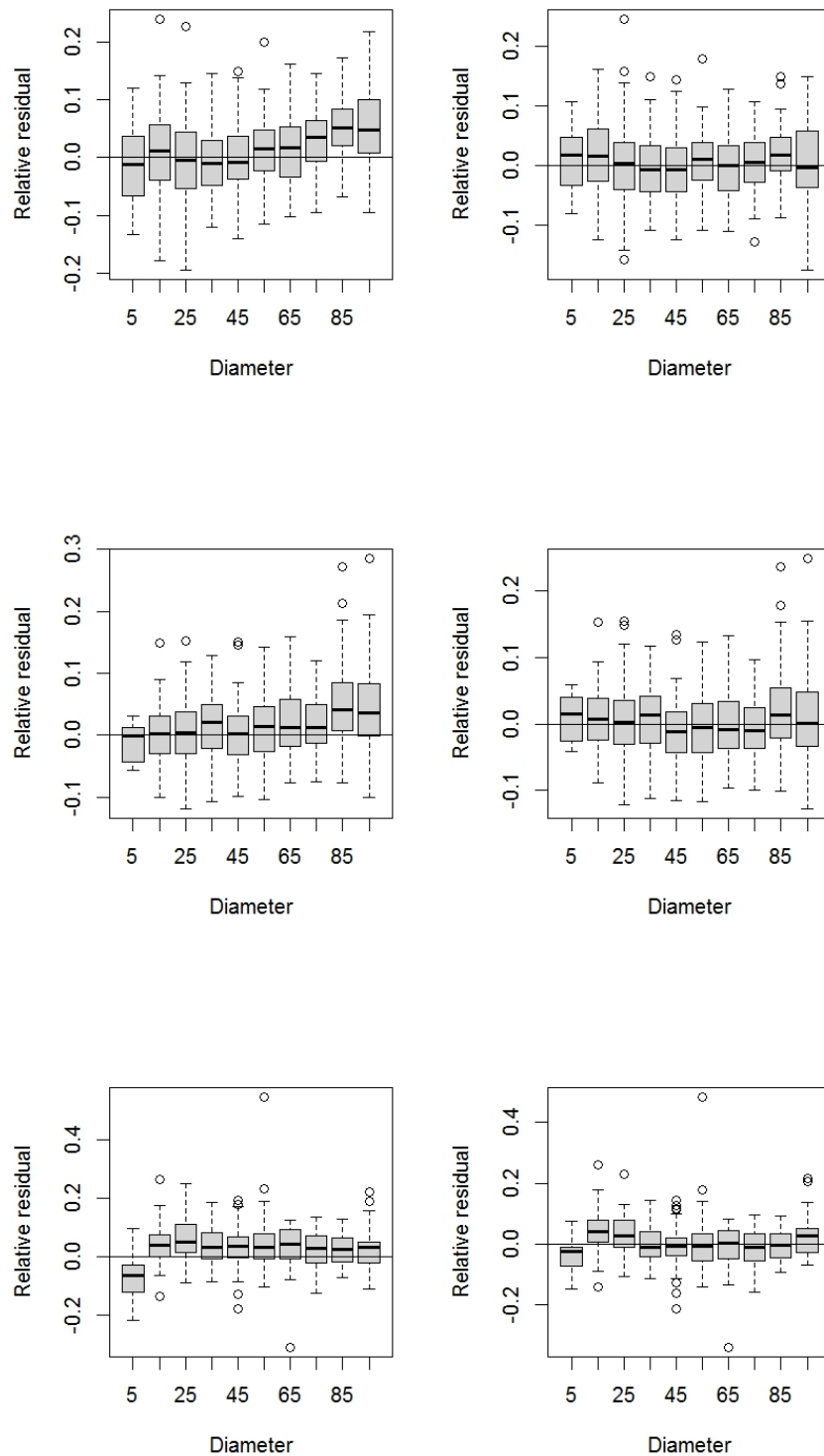
Edellä mainittujen virheiden kompensoimiseksi hankkeen aikana kehitettiin jatkokäsittelymenetelmiä (Pitkänen ym. 2019). Näiden menetelmien tarkoituksena oli hienosäätää puun syntypisteen ja latvan tunnistusta, tarkistaa sylinterimallin runkoläpimitat erillisiä ympyräsovituksia käyttäen, ja tarvittaessa jakaa sovitettava pistepilviaineisto yksittäisiin keilauksiin tuulen vaikutusten vähentämiseksi. Näiden toimenpiteiden havaittiin parantavan tuloksia, ja kehitystä jatkettiin VMI Malli –hankkeen puitteissa.

3.2.6 Uudet tilavuusmallit

Kun malli-hankkeessa keilatuille puille oli saatu laskettua tilavuus, aineisto yhdistettiin Laasasenahon vanhaan aineistoon, ja kaikille vanhoille tilavuusmalleille laskettiin uudet kertoimet. Tulosten perusteella on selvää, että puiden muoto on muuttunut. Esimerkiksi yhden selittäjän mallien ero vanhoihin malleihin käy ilmi kuvasta 12 (Kangas ym. 2019 käsikirjoitus). Kun kahden selittäjän mallin (61.3) kertoimet laskettiin uudestaan, lähes kaikille kertoimille estimoitiin tilastollisesti merkitsevä ero vanhan ja uuden aineiston välillä. Kun vanhan ja uuden mallin suhteelliset residuaalit laskettiin uudessa aineistossa, vanhoilla malleilla saaduissa ennusteissa oli läpimittaluokasta riippuen yli- tai aliarvioita, jotka uusi malli isoksi osaksi pystyi korjaamaan (Kuva 13).



Kuva 12. Estimoitu tilavuusmalli 61.1 (vasen) ja 61.2 (oikea) vanhalla (musta) ja uudella (sininen) aineistolla. Ylimpänä mänty, keskellä kuusi ja alimpana koivu.



Kuva 13. Suhteelliset residuaalit läpimittaluokittain vanhalla mallilla (vasen) ja uudella mallilla (oikea) uudessa TLS-aineistossa. Mänty ylimpänä, kuusi keskellä ja koivu alimpana.

3.3 Toteutusvaiheen arviointi

Kaukokartoitusosioissa teknisiä ongelmia aiheutti se, että kuvauksia tekevä drone putosi maahan moottorivian takia, ja Evon kuvaukset jäivät kesken. Kuvausta ei saatu toteutettua myöskään vuonna 2019 sääolosuhteiden vuoksi. Muutoin kaukokartoitustutkimukset menivät odotusten mukaisesti.

Otannan ja estimoinnin tehostaminen eteni suunnitelmien mukaisesti. Tasapainotetussa otannassa saavutettavat tehokkuushyödyt pienenevät jatkuvasti testien edetessä, koska ymmärrys relevantista vertailutasosta ja pysyvien koealojen merkityksestä lisääntyi testien edetessä. Jälkiositus otettiin suoraan käyttöön saatujen tulosten perusteella, mutta tasapainoisen otannan osalta käyttöönoton hyödyt verrattuna esimerkiksi pysyvien koealojen tuottamaan hyötyyn eivät lopulta olleet riittäviä. On kuitenkin oletettavaa, että designin optimointiin kaukokartoitustiedon avulla perustuvia menetelmiä kehitetään edelleen, ja jokin tämäntyyppinen menetelmä otetaan VMI:ssä operatiiviseen käyttöön myöhemmin. Kun laserkeilausaineistoa on kattavasti koko Suomesta, ja keilaukset on tehty tähänhetkistä selvästi lyhyemmällä intervallilla, voidaan tehokkuushyötyjä saada lisää.

Prioritiedon käytön osalta yksittäisten pikselien kohdalla saavutetut edut ovat jääneet odotuksia vähäisemmiksi, mutta pienalue-estimoinnin kohdalla menetelmiä kannattaa kehittää eteenpäin operatiivisen menetelmän kehittämiseksi.

Digikameroiden käyttökelpoisuus VMI puumittauksiin osoittautui jo ensimmäisissä kevyissä testeissä heikoksi, ja hyviin tuloksiin vaadittava kuvien määrä ja laatu operationaaliseen työhön epärealistisen isoksi. Vastaavia tuloksia on sittemmin tullut myös muualla (esim. Forsman ym. 2018). Digikameroiden käyttö hylättiin siten jo näiden ensimmäisten testien perusteella. Yllätys sen sijaan oli, että myös optiset mittauslaitteet osoittautuivat pettymyksiksi.

Vuoden 2016 maalaserkeilauksissa käytettiin varsin tiukkaan määriteltäviä asemapisteiden sijoittelua, jonka havaittiin olevan liian jäykkä ottaakseen näkemäesteet riittävällä tavalla huomioon. Tämän vuoksi asemapisteiden suunnittelu muutettiin VMI Malli hankkeen keilauksissa joustavammaksi siten, että paikalliset olosuhteet pystyttiin ottamaan paremmin huomioon. Lisäksi Malli-hankkeessa asetettiin mitattuihin puihin teipit tietyille korkeudelle avustamaan puiden syntypisteen oikeaa määrittämistä, ja kehitettiin jatkomallinnusta niin että kenttämittauksia voitaisiin hyödyntää pistepilviaineistojen automatisoidussa tulkinnessa.

3.4 Julkaisut

Vuonna 2016 tuloksia on esitelty CARISMA pohjoismaisen verkoston kokouksessa ”Large-scale mapping and estimating of forest resources” Åsissa Norjassa.

- Kangas, A. Comparing the efficiency of post-stratification and model-assisted estimation
- Haakana, H. Precision of forest statistics of the Finnish NFI using post-stratification based on satellite imagery
- Katila, M. Combining multitemporal small-area estimates for Finnish multi-source NFI

Vuonna 2017 tuloksia on esitelty IUFRO125 vuotta kokouksessa saksassa, Silvilaser 2017 konferenssissa USA:ssa ja CARISMA 2017 verkoston kokouksessa Helsingissä sekä Geoinformatiikan tutkimuspäivillä 2017 Helsingissä.

- Kangas, A. Forest data acquisition in Nordic countries - roadmap for the future. (esitelmä, IUFRO)
- Tuominen, S., Pitkänen, T., Balázs, A. & Kangas, A. Improved forest resource mapping by combined use of 2D and 3D remote sensing materials. (esitelmä, CARISMA)
- Pitkänen, T.P., Kangas, A. Preliminary results of the Finnish TLS data: from point cloud to QSM and beyond. (esitelmä, CARISMA)
- Tuominen, S., Pitkänen, T.P., Balázs, A. and Kangas, A. Comparing photogrammetric point cloud data to 2D and 3D remote sensing material for forest resources mapping.
- Tuominen, S. Katsaus metsien kaukokartoitusmenetelmien kehitykseen (Geoinformatiikan tutkimuspäivä 2017)

Vuonna 2018 hankkeen tuloksia on esitelty posterissa ForestSat 2018 kokouksessa Washingtonissa, IBC2018 kokouksessa Barcelonassa ja CARISMA kokouksessa Tanskassa:

- Rätty, M., Kangas, A., Heikkinen, J. & Korhonen K.T. Utilizing auxiliary information when designing field survey of National Forest Inventory. (ForestSat2018, poster)
- Kangas, A., Rätty, M., Heikkinen J. Efficiency of balanced sampling compared to stratification. (IBC2018, esitelmä).
- Pitkänen Timo. Using Sentinel-2 satellite images for automated detection of forest changes. (CARISMA, esitelmä. Sekä VMI2020 että Muutostulkintahanke osallistuneet kustannuksiin).
- Tuominen, S. Tree species recognition in species areas using UAV borne hyperspectral imagery and stereo-photogrammetric point cloud. (CARISMA, esitelmä)
- Kangas, A. Roadmap for the future. (CARISMA, esitelmä).

Vuonna 2019 hankkeen tuloksia esiteltiin DIABOLO Horizon2020-projektin loppukonferenssissa Kolilla ja Norjan NFI100 –kokouksessa Sundvollenissa, IUFRO:n maailmankongressissa ja SilviLaser-konferenssissa Brasiliassa:

- Haakana, H., Katila, M., Heikkinen, J. & Kangas, A. Post-stratification based on satellite imagery for downscaling information on forest resources (poster, NFI100)
- Kangas, A., Haakana, H., Katila, M. & Heikkinen, J. Visions and tools for future NFI in Finland. (esitelmä, Diabolo)
- Kangas, A., Gobakken, T. & Næsset, E., 2019. Usefulness of past inventory data as prior information in the future inventory (esitelmä, NFI100)
- Pitkänen, T. Possibilities of terrestrial laser scanning (TLS) to extend NFI measurements. (esitelmä, Diabolo)
- Pitkänen, T., Henttonen, H., Sarkkola, S. & Kangas, A. Using TLS to collect reference data for updating volume functions (poster, NFI100)
- Rätty, M., Heikkinen, J., Korhonen, K.T., Kuronen, M., Pitkänen, J., Ihalainen, A., Peräsaari, J., Mäkisara, K., Myllymäki, M., Kangas, A. Local Pivotal Method (LPM) for the Finnish NFI. (esitelmä, Diabolo)
- Rätty, M., Heikkinen, J., Kangas, A. Variance estimation of total growing stock volume in spatially balanced national forest inventory sampling. (poster, NFI100)

- Rätty, M., Kangas, A., Kuronen, M., Heikkinen, J. Variance Estimation in Spatially Balanced National Forest Inventory Sampling (Posteri, IUFRO maailmankokous)
- Rätty, M. Kangas, A., Korhonen, K.T., Vauhkonen, J., Packalen, T. NFIs of Europe towards future – visions and challenges. (Esitelmä, IUFRO maailmankokous).
- Rätty, M., Saarinen, N., Balázs, A. & Kangas, A. Enhancing sampling design by auxiliary information – potential of airborne laser scanning and satellite image based forest resources maps (esitelmä, SilviLaser)
- Tuominen, S., Balázs, A. & Kangas, A. Comparison of photogrammetric canopy models from archived and made-to-order aerial imagery in forest inventory. (poster, NFI100)

Hankkeesta on julkaistu tutkimusjulkaisuja seuraavasti:

- Haakana, H., Heikkinen J., and Kangas, A. 2019. Efficiency of post-stratification for a large-scale forest inventory – Case Finnish NFI. *Annals of Forest Science*. 76:9.
- Haakana, H., Heikkinen, J., Katila, M., & Kangas A. 2019. Precision of exogenous post-stratification in small area estimation based on a continuous national forest inventory. *Canadian Journal of Forest Research*.
- Kangas, A., Rätty, M., Korhonen, K.T., Vauhkonen, J., Packalen, T. 2019. Catering information needs from global to local scales - potential and challenges with national forest inventories. *Forests*.
- Kangas, A., Astrup, R., Breidenbach, J., Fridman, J., Gobakken, T., Korhonen, K.T. Maltamo, M., Nilsson, M., Nord-Larsen, T., Næsset, E & Olsson, H. 2018. Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33:397-412.
- Myllymäki, M., Gobakken, T., Næsset, E., & Kangas, A. 2017. The efficiency of post-stratification compared to model-assisted estimation. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 515–526.
- Niemi, P. 2018. Laserkeilattu metsävaratieto metsänhoidon toimenpiteiden edistäjänä. Pro gradu työ, Helsingin yliopisto.
- Pitkänen, T.P., Raumonen, P., & Kangas, A. 2019. Measuring TLS-based stem diameters in boreal forests by cylinder-based complementary fitting procedure. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147: 294-306.
- Pohjankukka J., Tuominen, S., Pitkänen, J., Pahikkala, T., Heikkonen, J. 2018. Comparison of estimators and feature selection procedures in forest inventory based on airborne laser scanning and digital aerial imagery. *Scandinavian Journal of Forest Research*.
- Rätty, M., Heikkinen, J. and Kangas, A. 2018. The efficiency of stratification compared to balanced sampling in Finnish NFI. *Canadian Journal of Forest Research* 48: 749–757.
- Rätty, M., and Kangas, A. 2019. Effect of permanent plots on the relative efficiency of spatially balanced sampling in a national forest inventory. *Annals of Forest Science*. 76:20.
- Rätty, M., Heikkinen, J., Korhonen, K.T., Peräsaari, J., Pitkänen, J., Ihalainen, A., Kangas, A. Effect of cluster configuration and auxiliary variables on the efficiency of local pivotal method for national forest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*.
- Stenman, V. 2019. Upper stem diameter and volume prediction strategies in National Forest Inventory (NF). Pro gradu työ. Helsingin yliopisto.
- Tuominen, S., Pitkänen, T., Balázs, A., and Kangas, A. 2017. Improving Multi-Source National Forest Inventory by 3D aerial imaging. *Silva Fennica* 51(4). doi:10.14214/sf.7743).

- Tuominen, S., Balázs, A., Honkavaara, E., Pölönen, I., Saari, H., Hakala, T., Viljanen, N. 2017. Hyperspectral UAV-imagery and photogrammetric canopy height model in estimating forest stand variables. *Silva Fennica* 51 5: Article id 7721.
- Tuominen S., Näsi R., Honkavaara E., Balázs A., Hakala T., Viljanen N., Pölönen I. Saari, H., Ojanen, H. 2018. Assessment of Classifiers and Remote Sensing Features of Hyperspectral Imagery and Stereo-Photogrammetric Point Clouds for Recognition of Tree Species in a Forest Area of High Species Diversity. *Remote Sensing* 10 5:28.

Julkaistavaksi tarjotut käsikirjoitukset:

- Haakana, M., Heikkinen, J., Katila, M., Tuomainen, T., Pitkänen T.P. & Henttonen, H. M. 2019. Estimating deforestation areas using CORINE land cover and multi-source NFI thematic maps as auxiliary information.
- Kangas, A., Gobakken, T., Næsset, E. Usefulness of past inventory data as prior information in the current inventory.
- Kangas, A., Henttonen, H.M., Pitkänen, T.P., Sarkkola, S., Heikkinen, J. Re-calibrating stem volume models – is there change in the tree trunk form from the 1970s to the 2010s?
- Katila, M. & Heikkinen, J. 2019. Reducing error in small-area estimates of multi-source forest inventory by multi-temporal data fusion.
- Pohjankukka, J., Tuominen, S. & Heikkonen, J. 2019. Data sampling in national forest inventory via Bayesian maximum variance inclusion. *Canadian Journal of Forest Research*
- Räty, M., Kuronen, M., Mäkisara, K., Kangas, A., Myllymäki, M. 2019a. Comparison of local pivotal method and systematic sampling design in the national forest inventories.
- Räty, M., Saarinen, N., Kankare, V., Balázs, A., Holopainen, M., Kangas, A. 2019b Enhancing forest inventory sampling with airborne laser scanning data and satellite image based Finnish multi-source national forest inventory data in the inventory design-phase.

Keskeneräiset käsikirjoitukset:

- Kuronen, M., Räty, M., Henttonen, H., Heikkinen, J., Kangas, A., Myllymäki, M. 2019. Blocking the permanent sample when selecting a temporal sample.
- Räty, M., Kangas, A., Heikkinen, J. 2019c. Testing variance estimators for spatially balanced sampling.
- Tuominen, S., Balázs A., & Kangas, A. 2019. Comparison of photogrammetric canopy models from archived and made-to-order aerial imagery in forest inventory.

4. Tulosten arviointi

4.1 Tulosten käytännön sovellutuskelpoisuus

Jälkiositustutkimukset on jo otettu osaksi VMI:n operatiivista laskentaa. VMI:n laskentapalvelu pystyy nyt tuottamaan harhattomia kuntatuloksia, joiden luotettavuus voidaan analyttisesti laskea. Tämä on parannus monilähdeinventointiin perustuviin kuntatuloksiin, koska ne voivat olla harhaisia, ja niiden luotettavuuden analyttinen laskenta on erittäin haastava tehtävä. Harhan mahdollisuus monilähdeinventoinnissa johtuu siitä, että kussakin

kunnassa tulosten laskemiseen käytetään myös kunnan ulkopuolelta mitattuja koealoja. Jälkiosituksessa käytetään vain kunnan alueelta mitattuja koealoja.

Muilla toimijoilla Suomessa ei ole vastaavaa tarvetta laskea tuloksia otoksesta, joten uudet sovellukset edellyttävät menetelmien käyttöönottoa muissa maissa. Tasapainoisen otannan tuloksia ei ainakaan vielä oteta käyttöön muualla kuin Ahvenanmaalla. Myös siinä uudet sovellukset edellyttävät, että menetelmä otetaan käyttöön jossakin muussa maassa. Vanhan inventointitiedon muodostamaa prioritetietoa, samoin kuin otannan tasapainotusta täytyy kehittää vielä lisää, ennen kuin ne ovat valmiit operatiivisen VMI:n osaksi. Uudet varianssiestimaattorit voidaan myös ottaa jatkossa käyttöön operatiivisessa VMI:ssä.

Menetelmiä, jotka voidaan ottaa laajemminkin käyttöön, kehitettiin maalaserkeilaus-aineistojen pistepilvien tulkintaan. Itse maalaserkeilaus ei ole vielä operatiivinen menetelmä, ja se soveltuu lähinnä tutkimusaineistojen keruuseen. Kehitetyt menetelmät on otettu heti käyttöön uusien tilavuusmallien laadinta-aineiston keruuta varten. Laasasenahon yhden selittäjän (pelkkä läpimitta) ja kahden selittäjän (läpimitta ja pituus) tilavuusmallit on estimoitu uudelleen käyttäen sekä vanhaa että uutta aineistoa. Kun mallit julkaistaan, ne voidaan implementoida käyttöön haluttaessa kaikkiin em. malleja soveltaviin ohjelmistoihin.

4.2 Tulosten tieteellinen merkitys

Tutkimus kaukokartoitusaineistojen hyödyntämiseksi valtakunnallisen inventoinnin tehostamisessa on käynnissä eri puolilla maailmaa. Tässä hankkeessa Suomen VMI on noussut aihepiiriin tutkimuksessa kansainväliseen eturintamaan. Ennen kärkihanketta Suomen VMI on ollut mallipohjaisen ja malli-avusteisen estimoinnin ja päättelyn osalta muita pohjoismaita ja USA:ta jäljessä. Prioritetiedon käytön osalta sekä varianssiestimaattoreiden kehityksen osalta Suomi on aivan kansainvälisessä kärjessä.

Tulevaisuudessa panoksia täytyy suunnata entistä enemmän esimerkiksi siihen, että inventoinnin luotettavuutta arvioitaessa voidaan huomioida myös muut kuin otannasta aiheutuvat virheet, kuten tilavuus- kasvu- ja biomassamallien virheet, ja ylipäättään luotettavuudet voidaan laskea kaikille julkaistuille tuloksille, kuten monilähdeinventoinnin tuottamille kuntatuloksille. Koska jälkiositus ei mahdollista tulosten laskemista kunnille, joissa on vain vähän tai ei yhtään VMI-koealaloja, täytyy kehittää edelleen monilähdeinventointiin perustuvia kuntatuloksia ja niiden hyödyntämistä yhdessä isommille kunnille laskettavien jälkiositustulosten kanssa. Tässä voidaan pyrkiä hyödyntämään aiempaa enemmän vanhoista inventoinneista saatavaa prioritetietoa.

Designin optimoinnin kehitystyötä jatketaan sekä LPM:n että myös muiden soveltuvien menetelmien osalta. Tähän mennessä olemme tutkineet erikseen otannan ja tuloslaskennan tehostamista. Tulevaisuudessa olisi tärkeää päästä arvioimaan uusien menetelmien yhteistä kokonaisvaikutusta inventointiin. Tällainen holistinen tarkastelu voi avata kokonaan uusia tutkimussuuntia, mitä emme pysty enakkoon arvioimaan.

Kaukokartoitusaineistojen tulokinnassa 3D-aineistot ovat selkeästi kertaluokkaa parempia kuin perinteiset 2D-aineistot. Sen sijaan eri menetelmillä tuotetut 3D-aineistot ovat keskenään hyvin samaa tasoa. Uusia kehitysaskelaita luotettavuuden parantamiseen uudella tekniikalla ei ole vielä näköpiirissä. Seuraavat uudet parannukset voidaan saavuttaa, kun 3D-aineistoa voidaan saada laajassa mitassa satelliiteista. Esimerkiksi 3D-tutkakuvauksaineistot voivat

parantaa monilähdeinventoinnin karttojen luotettavuutta, kun aineistoa saadaan käyttövalmiina laajoilta alueilta. Sen sijaan parannuksia on mahdollisesti odotettavissa koneoppimistekniikoiden käyttöönotosta kaukokartoitusaineistojen tulkinnassa. Uudet menetelmät mahdollistavat sen, että tulkinnassa käytettävät piirteet voidaan muodostaa koneoppimisella, eikä niitä tarvitse erikseen tuottaa. Tämä mahdollistaisi monien sellaisten kaukokartoituspiirteiden paremman hyödyntämisen, joita muuten on vaikea automaattisesti muodostaa, kuten aikasarjojen ja spatiaalisen naapuruston (esim. kohteiden toistuminen tai esiintyminen yhdessä toisten kanssa). Edelleen koneoppimisen menetelmillä voidaan mahdollisesti paremmin hyödyntää 3D-aineistojen pistepilven muodon ja rakenteen piirteitä, samoin kuin korkearesoluutioisten optisten kuvien kanavapiirteitä.