

HELSINGIN YLIOPISTO

Hakkuukoneen paikannetulla hakkuulaitteella
kerätyn puutiedon hyödyntäminen
lentolaserkeilaukseen perustuvan
puustotulkinnan aputietona

Atte Saukkola
Pro gradu –tutkielma
Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
Metsien ekologia ja
käyttö
Joulukuu 2017

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author Atte Saukkola			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Hakkuukoneen paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon hyödyntäminen lentolaserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsävarojen hallinta			
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu		Aika/Datum – Month and year Joulukuu 2017	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of page 90
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Kuviotason metsävaratietoa tarvitaan Suomessa yksityismetsätalouden suunnittelua ja metsäteollisuuden puunkorjuun suunnittelua varten. Hakkuukoneet mittaavat ja tallentavat kaadetuista rungoista useita läpimittoja sekä käyttöosan pituuden. Lisäksi jokaiselle kaadetuille puulle määritetään puulaji ja sijainti. Hakkuukonemittausten hyödyntäminen voisi tehostaa metsävaratiedon tuottamista ja parantaa sen laatua. Tällä hetkellä hakkuukoneella kerätyn puutiedon hyödyntämistä rajoittaa aineistojen saatavuus ja heikko yksittäisen kaadetun puun sijaintitarkkuus.</p> <p>Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutusta yksittäisen puun sijainnin määrittämisen tarkkuuteen tutkittiin vertaamalla puun todellista sijaintia estimaatteihin, jotka perustuivat hakkuukoneen ja hakkuulaitteen sijainteihin puun kaatohetkellä. Hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttöä aluepohjaisen puustotulkintamenetelmän aputietona tutkittiin käyttämällä kaukokartoitusaineistoihin perustuvien puustotunnusten ennustemallien opetusaineistona Uudenmaan alueelta kerättyyn hakkuukoneaineistoon muodostettuja ympyräkoaloja sekä maastokoaloja. Yksittäisten puiden paikannustavan, koelakokoon sekä tavallisten maastokoalojen määrä vaikutuksen selvittämiseksi puustotunnusten ennustamalleja laadittiin erilaisilla opetusaineistoilla. Vertailtavina tunnuksina olivat puustotunnusten keskineliövirheen neliöjuuret (RMSE) ja harhat, jotka laskettiin leimikkotason puustotunnusten ennusteiden ja vertailukohtana käytettyjen leimikkotason hakkuukonemittausten erotuksista. RMSE-arvot ja harhat laskettiin myös suhteutettuna vertailuaineiston puustotunnusten keskiarvoihin.</p> <p>Tulosten perusteella hakkuulaitteen paikannus parantaa yksittäisen puun sijaintitarkkuutta 2,93 metriä, päästen yksittäisen puun tasolla 7,86 metristä 4,93 metrin sijaintitarkkuuteen. Säteeltään yhdeksän metrin koaloille lasketun pohjapinta-alan poistuman RMSE tarkentui 35 prosentista 23 prosenttiin, kun koelalta hakatut puut paikannettiin hakkuukoneen sijasta hakkuulaitteen sijaintiin. Kun hakkuulaitteen paikannuksen avulla kerätyistä puutiedoista muodostettiin opetuskoaloja, niin aluepohjaisella menetelmällä ennustettujen leimikkokohtaisen pohjapinta-alan, runkoluvun, kokonaistilavuuden ja tukkitilavuuden RMSE tarkentui 4,1 – 18,1 prosenttiyksikköä kun koalojen pinta-ala oli 254 tai 509 neliometriä ja verrattavana olivat ennusteet, jotka perustuivat koaloihin, joissa yksittäiset puut oli paikannettu hakkuukoneen sijaintiin. Koelakoon ollessa 763 neliometriä tai enemmän ei paikannusmenetelmällä enää ollut vaikutusta puustotulkinnan tarkkuuteen. Hakkuukoneaineistoon muodostettujen koalojen käyttö yhdessä tavallisten maastokoalojen kanssa tuotti kaikilla puustotunnuksilla pienimmän RMSE:n, mutta ero pelkkien maastokoalojen avulla tuotettuun tarkimpaan ennusteeseen oli vähäinen. Tarkimmat pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteet saatiin joko hakkuukoneen sijaintia ja yli 509 neliömetrin koelakokoa käyttämällä tai hakkuulaitteen sijaintia ja alle 763 neliömetrin koelakokoa käyttämällä. Keskipituuden ja keskiläpimitan tarkimmat ennusteet saatiin hakkuukoneen sijaintia käyttämällä, mutta koelakoon vaikutus oli vähäinen. Hakkuukonekoalojen käyttö aluepohjaisen puustotulkinnan opetusaineistona tuotti kuviotasolla yliarvioita pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteisiin, mutta hakkuulaitteen paikannus pienensi ennusteiden yliarviota 254 ja 509 neliömetrin koelakoilla.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords aluepohjainen menetelmä, hakkuukonetieto, hakkuulaitteen paikannus, paikannustarkkuus			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikin Tiedekirjasto, Metsätieteiden laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information Ohjaaja dosentti Mikko Vastaranta. Tutkimus on tehty osana maa- ja metsätalousministeriön rahoittamaa ”Metsätieto ja sähköiset palvelut”-hanketta, jossa ovat mukana Helsingin yliopisto, Arbonaut Oy, VTT Oy sekä Metsäteho Oy.			

Sisällysluettelo

1.	JOHDANTO	4
1.1	Työn tausta	4
1.1.1	Puutieto ja puustotieto	5
1.1.2	Lentolaserkeilaus puuston mittaamisessa	6
1.1.3	Puustotunnusten ennustaminen lähimmän naapurin menetelmillä	11
1.1.4	Laserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuva puustotulkintamenetelmä	12
1.1.5	Hakkuukonetiedon hyödyntäminen laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona	16
1.2	Tavoitteet	20
2.	AINEISTO JA MENETELMÄT	22
2.1	Hakkuulaitteen paikannustarkkuuden selvittäminen	22
2.1.1	Tutkimusalue	22
2.1.2	Aineiston kerääminen	23
2.1.3	Aineiston laskenta ja analyysi	26
2.2	Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona	28
2.2.1	Tutkimusalue	28
2.2.2	Aineiston kerääminen	28
2.2.3	Aineiston laskenta ja analyysi	32
3.	TULOKSET	41
3.1	Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutus yksittäisen puun sijainnin määrittämiseen ja puittaisista tiedoista laskettuun hakkuupoistuman pohjapinta-alaan	41
3.1.1	Puiden sijainnin määrittämisen tarkkuus	41
3.1.2	Hakkuukoneen hakkaaman poistuman vertailu eri paikannusmenetelmillä	43
3.2	Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona	46
4.	TULOSTEN TARKASTELU	61
4.1	Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutus yksittäisen puun sijainnin määrittämiseen ja puittaisista tiedoista laskettuun hakkuupoistumaan	61
4.2	Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona	63
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
	Kiitokset	68
	Lähdeluettelo	69
	LIITTEET	78

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Suomen maapinta-alasta 86 prosenttia on metsätalousmaata ja metsäteollisuustuotteiden osuus Suomen viennistä on 20 prosenttia. Tietoa Suomen metsävaroista tarvitaan kansallisen ja kansainvälisen metsäpolitiikan tukena, alueellisen ja kansallisen metsäsuunnittelun tietolähteenä, teollisuuden investointipäätösten tukena, metsien hiilitaseen ja kasvihuonepäästöjen seurannassa sekä tutkimusaineistona (Metsäntutkimuslaitos 2014). Valtakunnan metsien inventointi on jo 1920-luvulta lähtien kerännyt tietoa puuston määrästä, kasvusta ja laadusta, sekä metsien terveydentilasta, monimuotoisuudesta, maankäytöstä ja metsiin sitoutuneesta hiilestä (Metsäntutkimuslaitos 2014). Strategista suunnittelutasoa varten tehdyn maastomittausotannan perusteella tuotetut metsävaratiedot ovat luotettavia suuraluetasolla, mutta kuviotasolla eivät tarkkuudeltaan riitä operatiiviseen metsäsuunnitteluun.

Suomen Metsäkeskus kerää kuviokohtaista metsävaratietoa yksityismetsätalouden suunnittelua sekä metsäteollisuuden puunkorjuun suunnittelua varten ja on merkittävin yksityismetsistä kuviokohtaista metsävaratietoa keräävä toimija (Suomen metsäkeskus 2016). Kerätyn metsävaratiedon avulla metsäteollisuus ja metsäalan toimijat pyrkivät suunnittelemaan tehtaiden puuhuoltoa, kohdentamaan markkinointia, seuraamaan toimenpiteiden toteutusta ja ohjaamaan puunkorjuun ja metsänhoidon operaatioita. Suomen metsäkeskus on vuodesta 2011 lähtien käyttänyt inventointimenetelmänä laserkeilausaineistoon, ilmakeilausaineistoon ja maastomittauksiin perustuvaa aluepohjaista inventointimenetelmää (ABA).

Metsävaratiedon kehityskohteita ovat ajantasaistus, toimenpiteiden päivitys, tiedon tuottamisen ja keräämisen automatisointi esimerkiksi hakkuukoneiden tiedonkeruun avulla, osallistavan tiedonkeruun lisääminen sekä aineistojen yhteiskäytön lisääminen (Arbonaut Oy 2015). Hakkuukoneella kerättyjen puu- ja leimikkotietojen mahdollisia hyödyntämistapoja tulevaisuudessa ovat esimerkiksi laatutunnusten ennustaminen (Bollandsås ym. 2011), käyttö laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona (Holmgren ym. 2012) sekä läpimitta- ja tavaralajijakauman ennustaminen (Barth ja

Holmgren 2013). Tutkimukset on testattu hakkuukoneella kerätyn puutiedon hyödyntämistä, mutta ongelmaksi menetelmissä on osoittautunut yksittäisen puun epätarkka sijainti. Ratkaisuna yksittäisen puun heikkoon sijaintitarkkuuteen on esitetty hakkuulaitteen paikantamista (Stendahl ja Dahlin 2002; Lindroos ym. 2015). Hakkuulaitteella tarkoitetaan hakkuukoneen osaa, joka kaataa, karsii, katkoo ja mittaa puun.

1.1.1 Puutieto ja puustotieto

Metsäteollisuuden puunhankinnassa tarvitaan tietoa esimerkiksi puun tilavuudesta, tavaralajiosuuksista, oksaisuudesta, järeydestä ja puulajikohtaisista runkolukusarjoista. Kansainvälisen metsäpolitiikan päätöksenteossa tarvitaan tietoa esimerkiksi puun sitomasta hiilen määrästä. Puutiedolla tarkoitetaan yksittäisen puun ominaisuuksia kuvaavia tunnuksia. Yksittäisen puun tasolla kerättävää tietoa voidaan mitata esimerkiksi rungosta, kannosta, juuristosta, oksista, lehdistä tai neulasista. Yksittäisen puun tunnuksia voidaan jakaa puusta suoraan mitattaviin tunnuksiin ja malleilla johdettuihin tunnuksiin. Malleja käytetään niiden tunnusten määrittämiseen, joiden fyysinen mittaaminen olisi liian vaivalloista (Kangas ym. 2004). Hakkuukonemittauksissa kannon korkeutta ei pystytä mittaamaan, jolloin puun rinnankorkeusläpimitta määritetään sovittamalla hakkuukoneen muodostama runkoprofiili Laasasenahon (1982) runkokäyriin (Melkas ja Hämäläinen 2015).

Puujoukoista kerätään tietoa koealaotannan avulla. Suomessa koko maan kattavia koealaotantoja tehdään VMI:ssa ja Suomen metsäkeskuksen puustoinventoinneissa. Yleisimmät koealatyypit ovat ympyräkoeala ja relaskooppikoeala. Tulevaisuudessa osa maastossa perinteisillä mittavälineillä mitatuista koealoista voitaisiin, jossain sovelluksissa korvata hakkuukoneen mittaamalla puutiedolla. Koealoilta mitataan halutut tunnuksia, jolloin otannan laajuudesta riippuen tunnuksia voidaan yleistää vastaaville metsäalueille (Kangas ym. 2004).

Yksittäisten puiden ja koealojen jälkeen seuraava tarkastelutaso on yleensä metsikkö, kuvio tai leimikko. Metsiköllä, metsäsuunnittelussa kuviolla, tarkoitetaan puustoltaan ja seuraavalta hoitotoimenpiteeltään yhtenäistä, yleensä vähintään puolen hehtaarin kokoista metsäaluetta. Leimikolla tarkoitetaan hakattavaksi suunniteltua saman metsätilan alueella olevaa aluetta tai kuvioita, joihin suoritetaan sama hakkuutoimenpide. Hakkuuta ja puunhankintaa suunniteltaessa leimikkotason tiedon tulisi olla

mahdollisimman tarkkaa. Suomen metsäkeskuksen käytössä olevalla aluepohjaisella inventointimenetelmällä päästään kuviotason puustotunnuksissa vähintään samaan tarkkuuteen, kuin jokaiselle kuviolle maastomittauksia kohdentavassa kuvioittaisessa arvioinnissa. Kuvioittaisella arvioinnilla esimerkiksi kuvion puuston kokonaistilavuus voidaan ennustaa noin 15-30 prosentin tarkkuudella (Suvanto ym. 2005).

Kuvioita tai leimikoita kuvaavat puustotunnukset ovat usein suhdeasteikollisia summatunnuksia. Hehtaariohtaisia summatunnuksia ovat esimerkiksi runkoluku (kpl ha⁻¹), tilavuus (m³ha⁻¹), biomassa (t ha⁻¹) ja pohjapinta-ala (m² ha⁻¹). Puustoa kuvaavia keskitunnuksia ovat esimerkiksi ikä (vuotta), keskiläpimitta (mm), keskipituus (dm) ja valtipituus (dm). Keskiläpimitalle tyypillistä on sen painottaminen pohjapinta-alalla, jolloin pienten puiden vaikutus keskiläpimittaan ei ole liian suuri. Kehitysluokka on järjestysasteikolla mitattava puustoa kuvaava tunnus, joka kuvaa puuston vaihetta kahdeksanportaisella asteikolla uudistusalasta päätehakkuun jälkeiseen suojuspuumetsikköön. (Kangas ym. 2004)

Yksittäisiä puita tai puustoa kuvaavat tunnuksia voidaan mitata tai estimoida. Mitatun tunnuksen avulla voidaan estimoida muita tunnuksia, joihin mitatulla tunnuksella on tilastollinen riippuvuus. Yksittäisille puille laadittuja malleja voidaan soveltaa myös runkolukusarjojen läpimittaluokkiin, mikäli runkojen läpimittajakauma on tarkasti tiedossa. Puustoa kuvaavia regressiomalleja ovat esimerkiksi Nyysösen ja Mielikäisen (1978) kehittämät tilavuuskasvumallit. Tulevaisuudessa on mahdollista hakkuukoneaineistoa hyödyntämällä ennustaa kuvioille läpimittajakauma aiempaa tarkemmin (Barth ja Holmgren 2013).

1.1.2 Lentolaserkeilaus puuston mittaamisessa

Lentolaserkeilaus tuottaa kolmiulotteista paikkatietoa käyttämällä lasertykin lähettämää energiaa. Laserkeilaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, joten se ei ole riippuvainen säätilasta tai auringonvalosta. Laserkeilaimen tärkeimmät osat ovat etäisyydenmittausyksikkö, opto-mekaaninen skanneri, laserin vastaanotin, GPS-vastaanotin, inertiamittausyksikkö sekä ohjaus- ja prosessointiyksikkö (Wehr ja Lohr 1999). Laserkeilain mittaa lasertykin ja säteen heijastaneen kohteen välisen etäisyyden säteen matka-ajan perusteella. Laserkeilainta kuljettavan alustan, yleensä lentokone tai helikopteri, sijainti saadaan selville satelliittipaikannuksen avulla. Inertiamittausyksikkö määrittää lasertykin asennon. Kun lasertykin sijainti, asento ja keilauskulma tunnetaan,

voidaan tarkasti määrittää myös sijainti, josta lasersäde heijastuu takaisin. Laserkeilaimet voivat vastaanottaa palautuvan säteen koko aallonmuodon tai osia siitä. Laserkeilauksen toimivuus puuston mittaamisessa perustuu laserin kykyyn erottaa maanpinta ja kuvata kasvillisuuden pituutta ja rakennetta (Næsset 2011). Puustoisella alueella iso osa pulsseista heijastuu takaisin jo kasvustosta, mutta osa läpäisee latvuskerroksen ja heijastuu takaisin maanpinnasta. Tuloksena saatavasta pistepilvestä voidaan suodattaa pintamalleja, esimerkiksi maan pinnan maastomalli (DTM), korkeimpia kaikuja hyödyntämällä tehty pintamalli (DSM) ja puuston pituusmalli (CHM tai nDSM) (Wehr ja Lohr 1999).

Ensimmäisiä tutkimuksia laserin käytöstä puiden mittaamisessa tekivät Neuvostoliitossa Solodukhin ym. (1977), Pohjois-Amerikassa Nelson ym. (1984) ja Euroopassa Nilsson (1996). Ennen 1990-lukua tehdyt tutkimukset käyttivät suoraan nadiirin suunnasta mittaavaa profiloivaa laseria, kunnes 1990-luvun aikana laserkeilaustekniikka kehitettiin. Laserkeilaus eroaa profiloivasta laserista mittaamalla leveää kaistaa, kun taas profiloiva laser mittaa pientä pistettä. Nilssonin (1996) tutkimuksessa laserpisteiden paikannus ei onnistunut ja menetelmä aliarvioi leimikon keskipituuden 2,1 – 3,7 metrillä. Laserkeilaustekniikan kehittyessä Næsset (1997a; 1997b) estimoit 36 testileimikon keskipituuden keskihajonnalla 1,1 – 1,6 metriä ja 36 testileimikon tilavuuden 82,8 – 26,1 m³ ha⁻¹ RMSE-arvoilla. Næssetin tutkimuksissa kuvioiden päälle luotiin 15 x 15 m hilaruudukko, jonka tutkimuksessa todettiin vähentävän menetelmän virhettä (Næsset 1997a).

Yleisimmät sensorit pystyvät tallentamaan vain yksittäisiä paluukaikuja, eivätkä koko aallonmuotoa (Wehr ja Lohr 1999). Koko aallonmuodon tallentavien keilainten etuna on esimerkiksi suurempi tallennettujen kaikujen määrä ja mahdollisuus kaikujen leveyden mittaamiseen (Persson ym. 2005; Reitberger ym. 2008). Lindberg ym. (2012) käytti koko aallonmuodon tallentavaa laserkeilainta ja yksittäisiä paluukaikuja tallentavaa laserkeilainta yhdessä kuvatakseen alikasvustoa ja puuston vertikaalista rakennetta kasvillisuuden tilavuuden avulla. Tulosten perusteella koko aallonmuotoa tallentavaa keilainta käyttämällä saavutettiin kasvillisuuden tilavuudelle 8,9 prosenttiyksikköä alhaisempi RMSE, kuin käyttämällä yksittäisiä paluukaikuja tallentavaa keilainta. Koko aallonpituutta mittaavan laserkeilauksen toimivuus rakenteen havaitsemisessa perustuu kaikujen leveyden muutokseen, kun puustossa eri korkeudella olevien pienien sirontaa aiheuttavien kohteiden määrä muuttuu (Wagner ym. 2008). Reitberger ym. (2008)

luokitteli kuuden maastokoealan puut havupuiksi tai lehtipuiksi 85 % tarkkuudella käyttäen koko aallonmuodon tallentavaa laserkeilainta, jonka pulssitiheys oli 25 pulssia m^{-2} .

Lentolaserkeilaamalla saadaan tietoa puuston rakenteesta ja maan pinnasta, mutta puulajien tunnistamiseen tarvitaan usein laserkeilausaineiston lisäksi ilmakuvia (Persson ym. 2004). Kaukokartoitusaineistojen yhdistämisessä ongelmana on esimerkiksi tuulesta johtuva puiden eri asento, kun aineistoja kerätään keskenään eri aikaan, tai katselukulman muutoksesta johtuva sävyarvojen muutos (BRF-efekti). Kun aineistoja kerätään keskenään eri aikaan. Valbuena ym. (2011) vertailivat lentolaserkeilauksen ja ilmakuvien yhdistämismenetelmiä ja totesivat pistepilven värjäämisen ilmakuvilla olevan ainoa kaukokartoitusaineistojen yhdistämismenetelmä, jolla päästiin alle metrin tarkkuuteen. Pistepilven värjäämisessä laserkeilauskaiut projektoidaan ilmakuvan katselukulmasta tasolle, kaiuille määritetään ilmakuvan mukainen pikseliarvo ja lopuksi kaiut palautetaan pistepilvimuotoon (Elstrom ym. 1998). Packalén ym. (2009) käytti puustotunnusten ennustemalleissaan selittäjänä ilmakuvilla värjätyin pistepilven piirteitä ja saavutti yhtä tarkkoja tai tarkempia puulajeittaisten puustotunnusten ennusteita kuin perinteisellä kuvioittaisella arvioinnilla saavutetaan.

Yksinpuintulkinta (Hyypä ja Inkinen 1999) on hilaruudukkoon perustuvan aluepohjaisen menetelmän (kappale 1.1.4) lisäksi laserkeilaukseen perustuva puustotulkintamenetelmä. Hyypä ja Inkinen (1999) estimoivat 89 puun pituuden alle metrin tarkkuudella käyttäen lentolaserkeilausaineistoa, joka oli pulssitiheydeltään 4 – 5 pulssia neliometriä kohden. Menetelmän toimivuus perustui aluepohjaisen menetelmän koealojen käytön sijasta puun ominaisuuksien suoraan mittaamiseen latvusmallista segmentoidusta pistepilvestä. Erikson ja Olofsson (2005) vertailivat kolmea eri menetelmää puiden latvusten segmentointiin laserkeilausaineistosta. Parhaiten toimi Brownin liikkeellä (Brownian motion) tuotettuun kuvaan perustuva menetelmä, joka tunnisti 164 testipuusta 95 % oikein.

Yu ym. (2004) tutkivat laserkeilausaineiston käyttöä puuston pituuskasvun ja hakkuupoistuman määrittämiseen keilausaineistosta. Pituuskasvun estimoinnin testissä käytettiin kahta eri laserkeilausaineistoa, joiden keräysajankohtien välissä oli kaksi vuotta. Kolmelta eri koealalta yhteensä 91 maastomitatusta puusta laskettua pituuskasvua verrattiin laserkeilausaineistoon segmentoiduista saman alueen 20 kuvion 4197 puusta

estimoituun pituuskasvuun. Kuviotason pituuskasvun estimaatin keskivirhe oli viisi senttimetriä, koealatasolla 10 – 15 cm. Poistumaa estimoitiin laserkeilausaineistoista muodostettujen kahden eri ajankohdan latvusmallin (CHM) erotuskuvan avulla. Automaattinen algoritmi tunnisti 73 % kaatuneista tai kaadetuista puista. Kaikki varttuneet tunnistettiin, mutta puita, joiden latvuksen läpimitta oli korkeintaan metrin, jäi tunnistamatta.

Gobakken ja Næsset (2004) tutkivat runkolukusarjan muodostamista harvapulssista laserkeilausaineistoa ja maastokoealoja hyödyntäen. 16 nuorelle ja 38 varttuneelle havupuuvaltaiselle koealalle estimoitiin regressioyhtälöillä läpimitta- ja pohjapinta-alajakaumien parametrit sekä 24. ja 93. prosenttipisteet käyttäen laserkeilausaineistosta laskettuja latvuston pituutta ja tiheyttä kuvaavia piirteitä. Jakaumana käytettiin kaksiparametrissa Weibull -jakaumaa. Estimoidusta jakaumasta laskettujen koealakohtaisten tilavuuksien ja mitattujen tilavuuksien keskihajonta vaihteli välillä 5,6 – 29,1 %.

Metsien monimuotoisuudelle tärkeän lahopuun tilavuuden estimoiminen laserkeilausaineiston avulla on tarkempaa kuin maastomitattuihin eläviin puihin perustuva lahopuun tilavuuden arviointi (Pesonen ym. 2008). Kolin kansallispuistossa 33 maastokoealalla mitattua maapuiden tilavuutta estimoitiin ensimmäisten laserkaikujen korkeuden keskihajonnalla sekä viimeisten kaikujen 10. prosenttipisteen intensiteettiarvoilla. Pystyyn jääneiden kuolleiden puiden tilavuutta estimoitiin ensimmäisten laserkaikujen korkeuden keskihajonnalla ja viimeisten kaikujen 90. prosenttipisteen intensiteettiarvoilla. Maapuiden tilavuuden suhteellinen RMSE oli tutkimuksessa 51,6 %, pystyyn jääneiden kuolleiden puiden 78,8 %. Estimoinneissa käytettiin regressiomalleja. Menetelmää ei suoraan voida käyttää talousmetsiin, koska toimivuus perustui latvuksessa olevaan aukkoon, joka hoitamattomassa metsässä tarkoittaa kuollutta puuta, mutta talousmetsässä todennäköisesti metsänhoitotoimenpiteitä ja biomassan viemistä metsästä. (Pesonen ym. 2008)

Närhi ym. (2008) testasivat kuusen taimikoiden inventointia ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittämistä harvapulssisen laserkeilausaineiston ja metsäsuunnitelmatietojen avulla. Koealojen keskipituus ja tiheys estimoitiin lineaarisilla sekamalleilla laserkeilausaineistoa ja metsäsuunnitelmatietoja käyttäen. Kiireellisyysluokitteluun käytettiin lineaarista erotteluanalyysiä ja toisena vaihtoehtona

keskipituuden ja tiheyden estimointiin kehitettyjä sekamalleja. Metsäammattilaisten maastossa tekemään kiirellisyysluokitteluun verrattuna erotteluanalyysi luokitteli 71,8 % koealoista oikein.

Naeset (2009) tutki puiden maanpäällisen biomassan estimoimista nuorista metsistä harvapulssisen laserkeilausaineiston avulla. Naeset (2009) muodosti regressiomalleja selittämään 79 maastokoealalta mitattua biomassaa laserkeilausaineistosta laskettujen latvuston pituuspiirteiden avulla. Mallien estimointitarkkuutta testattiin ristiinvalidoimalla ja suhteelliseksi RMSE:ksi saatiin 22,6 – 48,1 %. Puiden maanpäällisen biomassan estimoimista laserkeilausta hyödyntäen on tutkittu myös käyttämällä norjalaisen maastokoealainventoinnin lisäaineistona linjoittaista laserkeilausotantaa (Gobakken ym. 2012).

Vehmas ym. (2011) tutkivat tiheäpulssisen (3,2 – 7,8 pulssia m⁻²) laserkeilausaineiston käyttöä metsätyypin tunnistamiseen varttuneissa metsissä. Metsätyyppi luokiteltiin kuvioille käyttäen laserkaikujen korkeus- ja intensiteetti- ja k:n lähimmän naapurin menetelmää. Tulokset laskettiin ristiinvalidoimalla ja jakamalla aineisto testi- ja opetuskuvioihin. Optimaalisilla lähimmän naapurin mallin parametreilla saavutettiin 58 prosentin luokittelutarkkuus estimoitaessa kaikkia metsätyyppejä. Estimoitaessa vain yhtä metsätyyppiä saavutettiin 73 prosentin luokittelutarkkuus.

Vastaranta ym. (2011) tutkivat usean eri ajankohdan laserkeilausaineiston muutostulkintaan perustuvaa lumituhojen inventointia. Laserkeilausaineistojen pulssitiheys vaihteli 7,0 – 11,9 pulssia m⁻² välillä. 10 koealalle tehty muutosanalyysi löysi 66,3 % vahingoittuneista puista, joka vastasi 80,6 % kaikkien vahingoittuneiden puiden tilavuudesta. Saarinen ym. (2016) estimoivat laserkeilausaineiston ja VMI-aineiston avulla tuulituhoriskiä. Parhaina selittäjinä logistisessa regressiomallissa olivat latvuston pituus, korkeus merenpinnasta ja pääpuulajien runkotilavuus. Mallin tarkkuutta arvioitiin Nagelkerken selitysasteella, jolloin logistinen regressiomalli estimoiti tuhoriskiä 173 neliökilometrin alueelle 81 prosentin tarkkuudella.

Tulevaisuudessa puulajitunnistus on mahdollista tehdä aiempaa paremmalla tarkkuudella pelkkää laserkeilausaineistoa käyttäen. Optech Titan –keilaimella tehdyssä yksinpuintulkinnan testissä (Yu ym. 2017) tunnistettiin koepuiden puulaji parhaimmillaan 85,9 % tarkkuudella. Optech Titan käyttää kahta eri infrapunakanavaa ja yhtä vihreän aallonpituusalueen kanavaa. Monikanavakeilauksella voidaan vähentää

ilmakuvien tarvetta puustotulkinnassa, mutta toistaiseksi monikanavaisen laseraineiston hinta on kalliimpi kuin yksikanavaisen aineiston ja ilmakuvien yhteensä. (Yu ym. 2017)

1.1.3 Puustotunnusten ennustaminen lähimmän naapurin menetelmillä

Ei-parametrisia menetelmiä, kuten lähimmän naapurin menetelmiä, käytetään laserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuvassa aluepohjaisessa puustotunnusten ennustusmenetelmässä. Tomppo (1991) tutki euklidiseen etäisyyteen perustuvan k :n lähimmän naapurin käyttöä Landsat- satelliittikuvien kuvatulkinnaissa. K :n lähimmän naapurin menetelmä on käytössä yhdeksännestä Valtakunnan metsien inventoinnista (VMI) lähtien mitattujen koealojen yleistämisessä suuremmalle alueelle. Käytettyä menetelmäkokonaisuutta kutsutaan monilähdeinventoinniksi. (Kangas ym. 2004)

Lähimpien naapurien etsimiseen ja tulkinnaissa hyödynnettävien piirteiden painottamiseen Moeur ja Stage (1995) kehittivät kanonisiin korrelaatioihin perustuvan MSN-menetelmän. Packalén ja Maltamo (2006; 2007) tutkivat k -MSN-menetelmän käyttöä puulajikohtaisen tilavuuden, runkoluvun, pohjapinta-alan, pohjapinta-alapainotetun keskiläpimitan ja pituuden ennustamisessa harvapulssisen laserkeilausaineiston ja ilmakuvien avulla. Tulosten perusteella (Packalén ja Maltamo 2006; 2007) k -MSN-menetelmää käyttävä aluepohjainen puustotulkintamenetelmä tuotti vähintään yhtä tarkkoja ennusteita kuin perinteinen kuvioittainen arviointi.

Hudak ym. (2008) vertailivat euklidisen etäisyyden, mahalnobis- etäisyyden, itsenäisen komponenttianalyysin (ICA), k :n samankaltaisimman naapurin (k -MSN), kanonisen yhtenevyysanalyysin (GNN) ja Random Forest-menetelmän käyttöä lähimpien naapurien etsinnässä ja puustotunnusten estimoinnissa. Selitettävänä tunnuksina olivat puulajikohtainen pohjapinta-ala ja runkoluku ja selittäjinä laserkeilausaineistosta johdettuja tunnuksia. RSMD:lla (Root Mean Square Distance) mitattuna Random Forest -menetelmillä päästiin parhaaseen tarkkuuteen. Random Forest -menetelmä muodostaa algoritmille syötetyistä selittäjistä ja selitettävistä muuttujista satunnaisia osajoukkoja, joiden perusteella muodostetaan luokittelupuita. Lähimpiä naapureita Random Forest -menetelmällä valittaessa lähimmäksi naapuriksi määräytyy kohde, joka luokitellaan useimmiten samankaltaiseksi piirreavaruudessa luokituspuiden avulla. (Hudak ym. 2008).

McRoberts ym. (2015) tutki k:n lähimmän naapurin menetelmän optimoimista maanpäällisen puubiomassan estimoimisessa. Tutkimuksen aineistona oli 145 havupuuvaltaisen metsän ympyräkoealaa sekä alueelta kerätty harvapulssinen laserkeilausaineisto. McRoberts ym. (2015) tutkimuksessa käytetyt lähimmän naapurin menetelmän optimointikeinot olivat selittävien muuttujien määrän vähentäminen, poikkeavien havaintojen tunnistaminen ja poistaminen sekä selittävien muuttujien painottaminen niiden merkittävyyden mukaan. Optimoinnin tuloksena selitetyn vaihtelun määrä kasvoi 20 prosenttia, luottamusvälit pienenevät 35 prosenttia ja hehtaarikohtaisen biomassannusteen keskivirhe parhaimmillaan oli kolme prosenttia estimoidusta keskiarvosta.

1.1.4 Laserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuva puustotulkintamenetelmä

Laserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuva aluepohjainen puustotulkintamenetelmä on operatiivisessa käytössä ainakin Norjassa, Ruotsissa ja Suomessa. Næsset (2002) testasi laserkeilausaineistoa ja maastokoealoja hyödyntävää aluepohjaista menetelmää ja ennusti 61 mänty- tai kuusivaltaiselle iältään 44 – 153 -vuotiaalle kuviolle keskipituuden, keskiläpimitan, runkoluvun, pohjapinta-alan ja tilavuuden saaden ennusteen ja mittauksen väliseksi keskihajonnaksi 0,61 – 1,17 m, 1,37 – 1,61 cm, 16,9 – 22,2 %, 8,6 – 11,7 % ja 11,4 – 14,2 %. Ennen yhdistämistä kuviotasolle puustotunnukset ennustettiin 14,4 x 14,4 m hilaruudukolle käyttäen ositekohtaista regressiota. Maastokoealat jaettiin kolmeen ositteeseen ikäluokan ja valtapituuden kehityksestä johdetun indeksin (Braastad 1980) avulla. Næsset (2004b) arvioi ensimmäisten operatiivisten aluepohjaisten puustotulkintojen tuloksia. 46 000 hehtaarin metsien inventointi aluepohjaisella menetelmällä ei poikennut tarkkuudessa aiemmista pienemmän alueen testeistä (Næsset 2002, Næsset 2004a).

Ruotsissa laserkeilaukseen ja maastokoealoihin perustuvaa puustotulkintaa testasi ensimmäisenä Holmgren ja Jonsson (2004). 122 kuviolle ennustettu keskipituus, keskiläpimita, pohjapinta-ala ja tilavuus testattiin 29 kuvion tarkistusmittauksilla. Testin tuloksena edellä mainituille puustotunnuksille saatiin suhteelliseksi RMSE:ksi 5,0 %, 8,9 %, 12,5 % ja 14,1 %. Suomessa aluepohjaista menetelmää testasivat ensimmäisenä Suvanto ym. (2005). Tutkimuksessa ennustettiin regressioyhtälöillä 67 kasvatus- tai uudistamisvaiheen kuviolle keskipituus, keskiläpimita, pohjapinta-ala, tilavuus ja

runkoluku. Ennusteiden suhteelliset RMSE:t vastaavassa järjestyksessä olivat 5,3 %, 9,5 %, 8,3 % ja 9,8 % ja 18,1 %. Suvanto ym. (2005) ennustivat puustotunnukset suoraan koealoilta kuviotasolle ilman hilaruudukon käyttämistä.

Suomen Metsäkeskuksella vuodesta 2011 alkaen operatiivisessa käytössä olevassa aluepohjaisessa puustotulkintamenetelmässä inventoitavat alueet ovat kooltaan 100 000 – 200 000 hehtaaria ja jokaiselta inventointialueelta mitataan 600 - 800 maastokoealaa (Holopainen ym. 2015). Menetelmällä arvioidaan lentolaserkeilaus- ilmakehän- ja maastokoeala-aineistojen avulla nuorten kasvatusmetsiköiden (kehitysluokka 02), varttuneiden kasvatusmetsiköiden (kehitysluokka 03) ja uudistuskypsien metsiköiden (kehitysluokka 04) kokonaispuustolle ja puulajiositteille keskiläpimitta, keskipituus, pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus ja ikä. Taimikot arvioidaan mittaamalla taimikkokuvioilta maastokoealoja tai hakemalla tieto metsänkäyttöilmoituksista, kemera-hankkeiden toteutustiedoista tai muista metsänomistajilta saatavista tiedoista (Holopainen ym. 2015). Kamera tarkoittaa kestävän metsänhoidon rahoituslakia, jonka mukaista rahallista tukea heikosti kannattaville metsänhoitotoimenpiteille voi hakea Suomen metsäkeskukselta (Suomen metsäkeskus 2017).

Inventointiyksiköksi on Suomen Metsäkeskuksen menetelmässä valittu 16 x 16 metrin hilaruudukko. Yhden ruudun pinta-ala vastaa yhdeksän metrin ympyräkoealan pinta-alaa (Suomen Metsäkeskus 2016). Hilaruudun koon tulee olla sama kuin maastokoealan pinta-alan sekä riittävän iso sisältämään kokonaisia puiden latvuksia ja useita laserpulseja (Næsset 2002). Maastokoealojen koko valitaan arvioimalla suuremmasta koealasta saatavia hyötyjä sekä kustannuksia. Maastokoealaa mitattaessa puun rungon tulee olla koealan sisällä, kun taas kaukokartoitusaineistossa osa latvuksesta saattaa olla koealan sisällä, vaikkei puuta olisi maastomittauksessa sisällytetty koealalle. Koealaa suurennettaessa koealan rajalla olevien puiden osuus on pienempi ja koealan mahdollisen paikannusvirheen vaikutus vähenee (Frazer ym. 2011). Maastokoealoilta mitattavia puukohtaisia tunnuksia ovat puulaji, rinnankorkeusläpimitta ja pituus, joiden perusteella voidaan laskea pohjapinta-ala, tilavuus ja runkoluku (Næsset 2004). Mikäli kaukokartoitusaineisto on kerätty ennen maastokoealojen mittausta, voidaan maastokoealaotannon edustavuus varmistaa suunnittelemalla otanta kaukokartoitusaineistosta määritetyn metsien rakenteellisen vaihtelun mukaan (Frazer ym. 2011). Vaihtelun analysoimiseen kaukokartoituspiirteiden avulla voidaan käyttää esimerkiksi metsikön pituuden, pituuden hajonnan ja kasvillisuuspeitteen kanssa

korreloivia piirteitä. Keskinäisen korrelaation takia piirteiden määrää on rajoitettava (Lefsky ym. 2005; Maltamo ym. 2011).

Inventoitavat alueet ja maastokoealat lentolaserkeilataan ja ilmakuvaataan, jolloin jokaiselle hilaruudulle sekä maastokoealalle saadaan sen sijaintia vastaavat laser- ja ilmakuva- ja piirteet. Laserkeilausaineiston hankinnassa keilauslaitteisto ja käytetyt keilausasetukset vaikuttavat puustotulkinnan laatuun. Lentolinjoissa tulee olla vähintään 50 prosentin päällekkäisyys aukkojen välttämiseksi ja pulssitiheyden korottamiseksi (White ym. 2013). Vähimmäispulssitiheydeksi on tutkimuksissa saatu 0,5 – 1 pulssia neliometriä kohden. Vähimmäistiheyttä pienemmät pulssitiheydet vaikuttivat tuloksena estimoitaviin puustotunnuksiin (Treitz ym. 2012; Jakubowski ym. 2013). Mitä avoimempi latvusto metsässä on, sitä suurempaa keilauskulmaa voidaan käyttää (White ym. 2013). Keilauslaitteen tulee kyetä tallentamaan vähintään kaksi kaikua pulssia kohden, koska puustotulkinnassa tarvitaan maanpinnasta ja latvustosta heijastuneita kaikuja maan pinnan ja latvuston korkeuden ja rakenteen havaitsemiseksi. Maan pinta havaitaan viimeisiä kaikuja käyttäen (White ym. 2013). Aluepohjaisessa puustotulkintamenetelmässä selittäjinä käytettyjen laserkeilauspiirteiden tulee korreloida puiden pituuden, pituuden vaihtelun sekä tiheyden kanssa (Lefsky ym. 2005). Selittävien piirteiden valintaan voidaan käyttää automaattisia askeltavia algoritmeja, jotka valitsevat tilastollisesti merkitsevät piirteet kaikkien vaihtoehtojen joukosta, mutta laserpiirteiden keskinäisen korrelaation takia piirteiden määrä tulee pitää pienenä (White ym. 2013).

Ilmakuva-aineiston hankinta tehdään kesällä lehtien ollessa puussa. Suomen Metsäkeskuksen aluepohjaisessa puustotulkinnassa käytetyssä ilmakuva-aineistossa sivupeittona on 30 prosenttia ja pituuspeittona 80 prosenttia. Kuvauskorkeutena on käytetty 6-7 kilometria. Mitä korkeammalta kuvat otetaan, sitä enemmän ilman epäpuhtaudet haittaavat kuvaamista. Ilmakuvien toimittaja orto-oikaisee kuvat, luo niistä mosaiikin ja jakaa mosaiikin karttalehtiin (Arbonaut Oy 2015). Ilmakuvia käytetään aluepohjaisessa puustotulkintamenetelmässä ensisijaisesti puulajiositteiden ennustustarkkuuden parantamiseen (Packalén ja Maltamo 2006).

Maastokoealoilta mitattujen selitettävien muuttujien ja kaukokartoitusaineistosta mitattujen selittävien muuttujien tilastollisen riippuvuuden avulla ennustetaan jokaiselle hilaruudulle puustotunnukset. Lähimmän naapurin menetelmissä laskentamallien opetusaineisto koostuu maastokoealoilta mitatuista puustotunnuksista ja koealojen laser-

ja ilmakuvapiirteistä. Opetusaineiston ulkopuolelta tiedossa ovat ainoastaan selittävät muuttujat, eli laser- ja ilmakuvapiirteet, joiden avulla maastokoealoilta etsitään selittävien muuttujien piirreavaruudessa lähimmät havainnot. Lähimmiltä naapureilta poimitaan halutut selitettävät tunnuksset esimerkiksi piirreavaruuden etäisyydellä painotettuna keskiarvona. Jos naapureita haetaan vain yksi, tuodaan naapurilta mitatut selitettävät tunnuksset tarkasteltavalle yksikölle (Hudak ym. 2008). Mallinnusvaiheessa mallin toimivuutta arvioidaan ristiinvalidoimalla opetusaineiston sisällä. Vaihtoehtona ei-parametrisille malleille voidaan käyttää esimerkiksi regressiomenetelmiä (White ym. 2013). Aluepohjaisessa puustotulkinnassa käytettyjä ei-parametrisia menetelmiä ovat esimerkiksi MSN-menetelmästä (Moeur ja Stage 1995) kehitetty k-MSN ja harva bayesialainen estimointi (Tipping 2004; Junttila ym. 2008). Ei-parametristen menetelmien etuja parametrisiin menetelmiin nähden ovat niiden kyky ennustaa useita muuttujia samanaikaisesti ja kyky säilyttää opetusaineiston vaihtelu (Hudak ym. 2008).

Suomen metsäkeskuksen aluepohjaisessa puustotulkinnassa kuviorajat muodostetaan laser- ja ilmakuva-aineiston automaattisella segmentoinnilla. Menetelmä perustuu Leppänen ym. (2008) kehittämään algoritmiin. Algoritmi etsii puuston pituuteen ja tiheyteen liittyvien laserkeilauspiirteiden ja puulajiin liittyvien ilmakuvapiirteiden avulla aloituspistettä muistuttavia viereisiä alueita, joita liitetään yhteen muodostaen pikseli kerrallaan suurenevan kuvion. Kun segmentti sisältää useita pikseleitä, verrataan viereisiä pikseleitä muodostuneen segmentin keskiarvoon, kunnes viereiset pikselit eivät enää ole riittävän lähellä segmentin keskiarvoa.

Kun puustotunnukset on ennustettu koko laskentahilalle ja kuviointi muodostettu, leikataan hilaa kuviorajoilla, jolloin kuviokohtaiset summa- ja keskitunnukset voidaan laskea kuviorajojen sisäpuolelle jääviltä hilaruuduilta. Suomen metsäkeskuksen määrittämät aluepohjaisen puustotulkintamenetelmän kuviotason tavoitetarkkuudet on esitetty taulukossa 1.1. Kokonaispuuston osalta tarkkuusvaatimukseen on päästävä kahdeksassa kohteessa kymmenestä. Suomen metsäkeskuksen aluepohjaisessa puustotulkinnassa puulajeittain minimitaloitteeksi on asetettu kuvion pääpuulajin tunnistaminen.

Taulukko 1.1. SMK:n inventointimenetelmän kokonaispuuston tavoitetarkkuudet kuviotasolla. Kahdeksan kymmenestä kohteesta tulee päästä tavoitteisiin.

Tunnus	Tavoitetarkkuus	Yksikkö
<i>Pohjapinta-ala</i>	±3	m ² ha ⁻¹
<i>Keskiläpimitta</i>	±3	cm
<i>Keskipituus</i>	±2	m
<i>Keskitilavuus</i>	±20	%

Puulajeittaisten puustotunnusten tarkkuus on kokonaistunnuksia heikompi, mutta vähintään yhtä hyvä kuin perinteisessä kuvioittaisessa arvioinnissa (Packalén ja Maltamo 2007; Suomen metsäkeskus 2016).

1.1.5 Hakkuukonetiedon hyödyntäminen laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona

Laserkeilaukseen, ilmakeinon ja maastokoealoihin perustuvassa puustotulkinnassa maastokoealojen määrä ja laatu on keskeinen ennustetarkkuuden kannalta (Gobakken ja Næsset 2009; Frazer ym. 2011). Hakkuukone kaataa ja mittaa Suomessa päivittäin yli miljoona puuta (Melkas ja Hämäläinen 2015). Hakkuukoneen mittaamat puut voisivat tarjota automaattisesti täydentyvän maastomittaustietokannan puustotulkintasovellusten käyttöön (Lindroos ym. 2015). Maastokoealoilta mitattu ja hakkuukoneen mittaama puutieto kuitenkin eroavat toisistaan. Esimerkkinä eroista on mitattavien puiden valinta. Maastokoealoilta yleensä mitataan kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli tietyn alarajan olevat puut, kun taas hakkuukone mittaa puut, joista voidaan tehdä ainespuuta (Luoma ym. 2017). Läpimitan mittaus tehdään kolmiomittauksella, joka vastaa mittasaksilla ristiin mitattua läpimittaa. Hakkuukoneen mittaamasta läpimitasta laskettu tilavuus tallentuu tukki- ja kuitupuun läpimittavaatimukset (kuidulla minimilatvaläpimitta on yleensä viisi senttimetriä) täyttävälle osalle. Jokaiseen hakkuukoneen tuottamaan runkoprofiiliin voidaan sovittaa runkokäyrä, jolta myös puun pituus, runkomuoto ja latvan tilavuus voidaan laskea (Räsänen ym. 1998). Puiden ikää hakkuukoneella mitattaessa ei määritetä. Maastokoealoja mitattaessa koealan pääryhmä, kasvupaikka ja kehitysluokka kirjataan, mutta hakkuukoneen hakatessa leimikoita ei. Maastokoealoja mitattaessa koealan sijainti paikannetaan yleensä koealan keskipisteestä, mutta

hakkuukoneella koneen oma sijainti paikannetaan satelliittipaikannuksen (GNSS) avulla jokaisen puun kaatohetkellä. (Melkas ja Hämäläinen 2015)

Suomessa hakkuukoneiden keräämä tieto noudattaa ruotsalaisen Skogforskin ja suomalaisen Metsätehon ylläpitämää StanForD- standardia. StanForD on maailmanlaajuisesti vallitseva käytäntö tavaralajimenetelmässä ja sen jäseninä ovat kaikki merkittävät hakkuukonevalmistajat (Skogforsk 2017). Hakkuukone tallentaa prosessoinnin yhteydessä rungon pintaa pitkin kulkevan pituusmittarullan ja läpimittanturinin avulla jokaisesta kaatamastaan puusta läpimitat ja mittauskohdat 10 senttimetrin välein. Jokaisesta katkotusta pölkystä tallennetaan pituus, läpimitat, tilavuus ja puutavaralaji. Lisäksi järjestelmään tallentuu rungon käyttöosan pituus ja viimeisen katkaisusahauksen latvaläpimitta. Tallentuneet arvot perustuvat joko hakkuukoneen mittaukseen tai mittaustiedon avulla tehtyyn mallinnukseen. Hakkuukoneen satelliittipaikannusvastaanottimella (GNSS) päästään nykyään keskimäärin 3-4 metrin sijaintitarkkuuteen, mutta tarkkuutta on mahdollista parantaa ottamalla käyttöön virtuaalitukiasemien (VRS) avulla tehtävät korjaukset sekä hyödyntämällä yhdysvaltalaisen GPS:n lisäksi venäläistä GLONASS- ja eurooppalaista GALILEO-satelliittijärjestelmää. Hakkuukone tallentaa sijaintitiedon WGS84- ja EUREF FIN TM35- koordinaatteina. (Melkas ja Hämäläinen 2015)

Hakkuukonetietoa kerätään aina, kun hakkuuta tehdään. Puukaupan tekoon tarvittavan hakatun kertymän mittaamisen lisäksi hakkuukoneen mittaaman puutiedon hyödyntämistä on tutkittu myös puuston inventoinnin tietolähteenä. Stendahl ja Dahlin (2002) tutkivat hakkuukonetiedon käyttöä puustotietojen päivittämiseen harvennuksen jälkeen. Menetelmässä oletettiin ajouralta hakattujen puiden edustavan kuvion tilannetta ennen hakkuuta, koska ajouran päältä kaikki puut hakataan. Koko kuvion edustavuutta ennen hakkuuta ajouran puilla ei odotettu aina saavutettavan, koska hakkuukoneen kuljettaja valitsee ajouran kulkemaan kuvion vähemmän tiheissä kohdissa. Kuvion tilanne hakkuun jälkeen saatiin vähentämällä hakkuukoneen mittaamat kaadetut puut arvioidusta puustosta ennen hakkuuta. Hakkuukoneen kuljettaja voi sijoittaa ajouran kuviolla joko keskimääräistä tiheämpään tai harvempaan kohtaan. Tiheämmässä kohdassa perusteluna ajouralle on suurempi harvennustarve, harvemmassa kohdassa perusteluna on vähäinen jäävien puiden kaatamistarve. Tutkimustulosten mukaan ajoura sijoitettiin kohtiin, joissa puusto ajouran keskellä edusti muuta kuviota. Kuvion keskiläpimitan ja keskipituuden päivittämisessä menetelmä tuotti tuloksia lähelle

hakkuuta edeltävää tilaa. Runkoluvun ja pohjapinta-alan ennuste ei onnistunut tuottamaan tarkkoja tuloksia tilanteesta hakkuun jälkeen. Menetelmän operatiiviselle tasolle siirtoon Stendahl ja Dahlin (2002) toteavat hakkuukoneen satelliittipaikannustarkkuuden riittämättömäksi. Puiden sijaintitarkkuuden tulisi riittää puiden luokitteluun ajouralla tai ajouran ulkopuolella sijaitseviksi. Nykyisillä hakkuukoneen tiedonkeruujärjestelmillä yksittäisen puun sijaintitarkkuuteen vaikuttavat hakkuukoneen satelliittipaikannusjärjestelmän epätarkkuus ja tuntematon hakkuulaitteen etäisyys hakkuukoneeseen (Stendahl ja Dahlin 2002).

Rasinmäki ja Melkas (2005) tutkivat puulajijakauman ja tilavuuden arvioimista leimikon eri osille. Tutkimuksessa testattiin kahden päätehakkuuleimikon osittamista neljällä eri menetelmällä ja puiden todellisen sijainnin simuloimista hakkuukoneen sijaintitiedon perusteella, jotta puiden sijainnit vastaisivat paremmin niiden todellisia sijainteja leimikoilla. Tutkimuksessa tarkin tulos saatiin suurimmalla leimikon ositekoolla, tukkitilavuuden RMSE:n ollessa kahdeksan kuutiota hehtaaria kohden. Suurin leimikon ositeko oli keskimäärin 0,4 hehtaaria. Tutkimuksessa havaittiin, että puun sijainnin simulointi hakkuukonetiedon avulla tarkensi puulajijakauman ja tilavuuden arviointia. Hakkuukonemittauksista laskettujen leimikonositteiden puustotietojen arvioitiin olevan mahdollinen opetusaineisto kaukokartoitusmenetelmille. (Rasinmäki ja Melkas 2005)

Bollandsås ym. (2011) käytti hakkuukoneen paikantamia ja mittaamia 29 eri päätehakkuuleimikon puita puun laatutunnusten ennustamisen vertailuaineistona. Vaikeuksia aiheutti paikannustapa, jossa puut ovat paikannettu hakkuukoneen kohdalle. Ongelma ratkaistiin jakamalla kuvio 50 x 50 metrin ruutuihin. Huomioimalla sekä hakkuukoneen satelliittipaikannuksen virhe että puun keskimääräinen etäisyys hakkuukoneesta kaatohetkellä, oletettiin menetelmän paikantavan 20 - 25 prosenttia puista väärälle hilaruudulle. Paikannusvirheestä huolimatta esimerkiksi keskipituuden, pohjapinta-alan ja tilavuuden ennustaminen ympyräkoaloille pystytään tekemään riittävällä tarkkuudella, vaikka paikannusvirhe olisi yhtä suuri kuin koalan säde (Gobakken ja Næsset 2009).

Holmgren ym. (2012) tutki hakkuukoneen mittaamien puiden hyödyntämistä laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona. Holmgren ym. (2012) tutkimuksessa hakkuukoneen 20 leimikolta kaatamat puut yhdistettiin laserkeilausaineistosta eroteltuihin latvussegmentteihin. Tutkimuksessa käytettiin

tiheäpulsseista (15 pulssia m⁻²) laserkeilausaineistoa. Koealojen puut (4 koealaa/leimikko, säde 10 m) oli numeroitu maastomittauksen yhteydessä, jolloin hakattaessa hakkuukoneen kuljettaja yhdisti kaadetun puun maastossa mitatut tiedot hakkuukoneen mittaamiin tietoihin. Mikäli hakkuukoneen paikantama puu oli laserkeilausaineistosta muodostetun latvussegmentin sisällä, oletettiin puun vastaavan segmenttiä. Jos puu oli segmentin ulkopuolella, yhdistettiin se laserkeilauspiirteiltään lähimpään segmenttiin k-MSN-menetelmällä. Jos segmenttiin osui useita puita, käytettiin tilavuuden osalta runkotietojen summaa. Hakkuukonemittausten ja latvussegmenttien avulla muodostettiin opetusaineisto, jonka avulla on mahdollista ennustaa puustotunnuksia kuvioilta, joita ei ole vielä hakattu. Opetusaineiston tuottamismenetelmän tarkkuutta arvioitiin ristiinvalidoimalla kuvioiden sisällä olevia yhdistettyjä maastomittauskoealoja (2 - 4 koealaa kuviota kohden). Ristiinvalidoimalla saavutettu koealataso suhteellinen RMSE oli tilavuudelle 11 %, keskipituudelle 8 %, keskiläpimitalle 12 % ja runkoluvulle 19 %. Tutkimuksessa käytetyt puut olivat maastossa numeroidut ja tarkasti paikannetut, jolloin hakkuukoneen kuljettaja pystyi yhdistämään puiden sijainnit hakkuukoneen mittaamiin tietoihin. Holmgren ym. (2012) toteaa, että menetelmän operatiiviselle tasolle siirtäminen vaatisi hakkuukoneille teknisen valmiuden määrittää kaadetun puun sijainti automaattisesti ja nykyistä tarkemmin.

Barth ja Holmgren (2013) tutkivat 17 leimikolla hakkuukonetiedon ja laserkeilausaineiston hyödyntämistä läpimittajakauman ja tavaralajijakauman simuloimisessa käyttäen samaa aineistoa ja latvusten segmentointimenetelmää, joka esiteltiin Holmgren ym. (2012) tutkimuksessa. Barth ja Holmgren (2013) vertailivat laserkeilauksesta ja hakkuukonemittauksista, laserkeilauksesta ja maastomittauksista sekä leimikon keskiarvoista laskettuja läpimitta- ja tavaralajijakaumia koealatasolla ristiinvalidoimalla. Menetelmä tuotti yhdistettyjen koealojen tasolla tilavuuden aliarvioita, koska osa puista ei luokitunut minkään latvussegmentin alle. Reynoldsin virheindeksillä (Reynolds ym. 1988) mitattuna hakkuukonemittauksista ja tiheäpulsseista laserkeilausaineistoa käyttämällä saavutettiin kolmesta menetelmästä pienin virhe. Johtopäätöksenä oli, että tiheäpulsseista laserkeilausaineistosta ja hakkuukonemittauksesta muodostettua opetusaineistoa voidaan hyödyntää vielä hakkaamattomien leimikoiden läpimitta- ja tavaralajijakaumien simuloimisessa, mutta operatiiviseen käyttöön vieminen edellyttäisi kaadettujen puiden automaattista ja aiempaa

tarkempaa paikannusta. Tutkimus myös toteaa muutaman metrin virheen olevan hallittavissa, kunhan virhe on systemaattinen.

Söderberg (2015) tutki Pro Gradu- tutkielmassaan hakkuukonetiedon käyttöä laserkeilaukseen perustuvan aluepohjaisen inventointimenetelmän opetusaineistona. Tutkimuksessa ennustettiin kuusi- tai mäntyvaltaisille päätehakkuuleimikoille kokonaistunnuksina kuviotason tilavuus, keskipituus ja keskiläpimitta käyttäen mallien laadinnassa sekä regressioanalyysiä että k:n lähimmän naapurin menetelmää. 168 leimikon aineisto jaettiin satunnaisesti 88 opetusleimikkoon ja 80 testileimikkoon. Laserkeilausaineiston pulssitiheys oli 0,5 – 1 pulssia m⁻². Opetusaineistona testattiin leimikon jakamista erikokoisiin rastereihin ja segmentteihin. Suhteelliset RMSE:t edellämainituille tunnuksille olivat Söderbergin (2015) tutkimuksessa 11 %, 5 % ja 8 %, eikä ennustusmenetelmällä ollut merkittävää vaikutusta. Tutkimuksen tuloksista pääteltiin, että ennustustarkkuuden parantamiseksi hakkuukoneen keräämän puutiedon paikannustarkkuutta pitäisi kehittää.

Yksittäisen puun sijaintitarkkuuden parantamiseksi on tutkittu GNSS-vastaanottimen asentamista suoraan hakkuulaitteeseen sekä reaaliaikaisen kinemaattisen mittauksen (RTK), GNSS-paikannuksen ja puomin liikkeitä mittaavien antureiden yhdistämistä hakkuulaitteen paikantamiseksi (Hauglin ym. 2017). 73 tarkasti paikannetun testipuun sijainnin keskivirheeksi saatiin 7 metriä, kun GNSS-vastaanotin asennettiin suoraan hakkuulaitteeseen. RTK-menetelmällä saavutettiin 0,94 metrin sijainnin keskivirhe. Tutkimuksessa (Hauglin ym. 2017) päästiin yksittäisen puun paikannustarkkuudessa alle metriin, mutta menetelmä vaatii uuden sensoritekniikan asentamista hakkuukoneisiin.

1.2 Tavoitteet

Uudistuskypsiin metsiin puustoennusteita tuottaessa ennustustarkkuuteen vaikuttavat ennustemallien laadinnassa käytettävien koealojen koko, laatu ja määrä (Gobakken ja Næsset 2009; Frazer ym. 2011). Hakkuukoneaineistoon muodostettavien koealojen käyttö laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona voisi parantaa puustotulkinnan tarkkuutta, vähentää tai poistaa kokonaan tarpeen maastomittauksille päätehakkuukypsissä metsissä tai voisi yhdessä maastokoealojen kanssa tarkentaa ennusteita. Useissa tutkimuksissa (Bållandsås ym. 2011; Holmgren ym. 2012; Barth ja Holmgren 2013) yksittäisen puun sijaintitarkkuus hakkuukoneaineistossa on ollut

hakkuukonetiedon uusien käyttötapojen suurin este. Yksittäisen puun paikantamisen hakkuukoneen hakkuulaitteen avulla voidaan olettaa parantavan puun sijaintitarkkuutta ja hakkuukoneella mitatun puutiedon käyttökelpoisuutta laserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona (Stendahl ja Dahlin 2002; Lindroos ym. 2015; Hauglin ym. 2017).

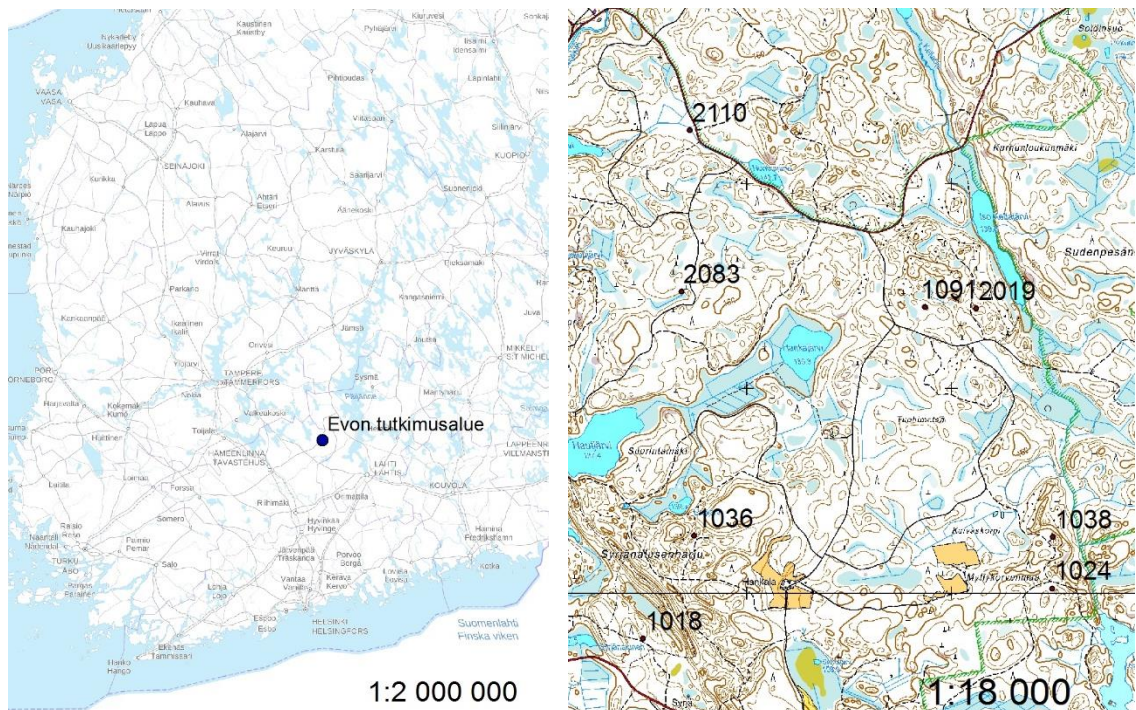
Tässä Pro Gradu -työssä tutkitaan hakkuukoneen hakkuulaitteen paikannuksen vaikutusta hakattujen puiden sijainnin määrittämisen tarkkuuteen ja paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttöä laserkeilaukseen perustuvan aluepohjaisen puustotulkinnan (ABA) aputietona. Hakkuukoneella kerätyn puutiedon käyttöä aluepohjaisen puustotulkinnan aputietona tutkivan osion tavoitteena on selvittää puutiedon paikannusmenetelmän, koealagoon sekä Suomen metsäkeskuksen maastokoealojen ja hakkuukoneella mitatun puutiedon yhteiskäytön vaikutus puustotulkinnan tarkkuuteen.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Hakkuulaitteen paikannustarkkuuden selvittäminen

2.1.1 Tutkimusalue

Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon sijaintitarkkuuden selvittämiseen käytettiin aineistona kahdeksaa kesällä 2014 mitattua maastokoealaa, jotka sijaitsivat Evon tutkimusalueella Etelä-Suomessa (61.19° N, 25.11° E, kuva 2.1). Koealojen koko oli 32 x 32 m (1024 m²) ja niistä kuusi oli pääpuulajiltaan männikköjä ja kaksi kuusikkoja. Koealat olivat kehitysluokiltaan varttuneita kasvatusmetsiä ja uudistuskypsiä metsiä. Koealat valittiin niiden saavutettavuuden, puuston ja pääpuulajin perusteella. Hakkuukoneen tuli saavuttaa koealat helposti, joten niiden tuli sijaita lähellä tietä. Tutkimusaineiston keruussa ei huomioitu metsänhoitosuosituksia, vaan hakkuut toteutettiin voimakkaana harvennuksena tai päätehakkuuna, jotta koepuiden määrä olisi ollut mahdollisimman suuri. Koealojen puustotiedot on esitelty taulukossa 2.1.



Kuva 2.1. Vasemmalla Evon tutkimusalueen sijainti. Oikealla koealojen sijoittuminen Evon tutkimusalueelle.

Taulukko 2.1. Paikannustarkkuustutkimuksessa käytettyjen koealojen puustotiedot ennen hakkuita. Pääpuulaji 1 tarkoittaa mäntyä, 2 kuusta ja PPA pohjapinta-alaa.

Koeala	Pääpuulaji	Runkoluku (N ha ⁻¹)	Tilavuus (m ³ ha ⁻¹)	Pohjapinta-ala (m ² ha ⁻¹)	PPA-painotettu keskipituus (dm)	Keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta (mm)
1018	1	781	217.0	23.7	190.5	191
1024	1	1182	199.9	22.9	182.2	138
1036	1	1387	180.1	24.4	149.7	142
1038	1	1230	310.8	30.9	211.5	163
1091	1	1563	266.6	29.5	187.3	140
2019	1	1436	229.7	27.3	173.3	141
2083	2	596	235.0	22.7	218.6	209
2110	2	586	356.9	32.1	245.1	249

2.1.2 Aineiston kerääminen

Maastomittaus- ja maastolaserkeilausaineisto

Hakkuulaitteen paikannustarkkuuden arvioimiseksi koealoille oli jo 2014 muodostettu tarkat puukartat maastolaserkeilauksen ja reaaliaikaisen kinemaattisen mittauksen (RTK) avulla. Maastolaserkeilauksen ja RTK-menetelmän avulla määritettyjä puiden sijainteja kutsutaan tässä tutkimuksessa puiden todellisiksi sijanneiksi ja ne toimivat vertailukohtana hakkuulaitteen paikannustarkkuuden arvioinnissa. Koealojen rinnankorkeudeltaan yli viiden senttimetrin puista oli lisäksi määritetty puulaji, mitattu läpimitta mittasaksilla (Haglöf Mantax Blue) ja pituus elektronisella pituusmittarilla (Haglöf Vertex IV Ultrasonic). Luoma ym. (2017) tutkimuksessa vastaavilla menetelmillä mitattujen rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden tarkkuus oli 0,3 senttimetriä ja 0,5 metriä. Koealoille maastomittausten perusteella lasketut puustotiedot on esitetty taulukossa 2.1.

Koealat keilattiin Leica HDS6100- laserkeilaimella (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Sveitsi) viidestä keilauspisteestä. Keilauspisteiden sijainti saatiin jakamalla koeala neljään yhtä suureen neliöön, joiden jokaisen keskeltä tehtiin yksi keilaus. Tämän lisäksi viides keilaus tehtiin koko koealan keskipisteestä. Koealojen eri keilaukset yhdistettiin koealakohtaisiksi pistepilviksi koealojen puihin kiinnitettyjen tähyspallojen avulla (6/koeala). Koealoille luotiin maastolaserkeilausten perusteella puukartat. Puiden sijainnit saatiin laserkeilauspistepilvestä leikkaamalla noin 1,3 metrin korkeudelta kaistale pistepilveä ja visuaalisesti etsimällä puut leikatusta pistepilvestä. Puiden sijainti

merkittiin mahdollisimman tarkasti puun keskipisteeseen. Puukarttaa täydennettiin, kun maastomittauksessa löydettiin puita, joita ei oltu visuaalisesti tunnistettu pistepilvestä. Maastossa paikannettujen puiden sijainti määritettiin mittaamalla bussolilla suunta ja mittanauhalla etäisyys neljään muuhun eri ilmansuunnissa oleviin pistepilvestä tunnistettuihin puihin. Mikäli puukartalla sijaitsevaa puuta ei löytynyt maastomittauksissa, poistettiin se puukartalta. Bussolin ja mittanauhan avulla paikannettuja puita oli 25 prosenttia koealojen kaikista puista.

Maastolaserkeilauksesta saadusta pistepilvestä tunnistetut puut olivat paikallisessa koordinaatistossa. Puut georeferoitiin ulkoiseen koordinaatistoon koealan keskipisteen ja koealan kulmien avulla. Tähyspallojen, keskipisteen ja kulmien sijainti määritettiin Trimble R8 GNSS-vastaanottimen ja Trimble 5602 takymetrin avulla. GNSS-vastaanottimelle etsittiin koealalta tai sen läheisyydestä paikka, jossa puiden latvusto ei häiritse GNSS-signaalia. Tähyspallojen, koealan keskipisteen ja kulmien sijainti suhteessa GNSS-paikannettuun pisteeseen mitattiin takymetrillä. 2D-paikannustarkkuus on vastaavalla GNSS-vastaanotinta ja takymetria käyttävällä menetelmällä todettu olevan alle 10 senttimetriä (Kaartinen ym. 2015). Bussolin ja mittanauhan avulla paikannetuille puille tarkkuus on noin metri. Tarkkuusarvio perustuu neljän suunta- ja etäisyysmittauksen hajonnan tarkasteluun.

Hakkuukoneen ja hakkuulaitteen sijaintiin paikannettu puutieto

Evon koealoille tehtiin kesäkuun 2016 aikana erikoishakkuut tutkimusta varten Komatsu Forest 931.1- mallisella hakkuukoneella (kuva 2.2), johon oli asennettu hakkuulaitteen sijainnin selvittämiseen suhteessa hakkuukoneeseen tarvittavat anturit. Komatsu Forestin 931.1 –mallissa hakkuukoneen puomia käännettäessä myös hakkuukoneen ohjaamo kääntyy säilyttäen saman suunnan kuin puomi. Hakkuulaitteen paikannus on toteutettu mittaamalla hakkuukoneen puomin suunta ja etäisyys puiden kaatohekellä, jolloin on mahdollista laskea hakkuulaitteen sijainti suhteessa hakkuukoneen sijaintiin. Määritetty hakkuulaitteen sijainti oletetaan kaadetun puun sijainniksi. Asennettu laitteisto ei kerännyt tietoa puomin jatkovarren asennosta. Hakkuukone on paikannettu hakkuukoneen omalla Garmin GPS 16XHVS- vastaanottimella.

Hakkuukoneen tallentamat puukohtaiset tiedot ja maastomittauksissa ja – laserkeilauksissa mitatut puut yhdistettiin puille maastolaserkeilausvaiheessa annetun ID-numeron ja hakkuukoneen hakkuujärjestyksen kirjaamisen avulla. Ennen hakkuuta

koealojen puihin kiinnitettiin molemmin puolin puuta laput, joissa luki puulle annettu ID-numero. Koealoja hakattaessa kirjattiin kaadettavien puiden järjestysnumerot hakkuukoneen tietojärjestelmästä ja merkattiin järjestysnumero koealan puulistalle kaadetun puun kyljen lapussa lukevaa ID-numeroa vastaavalle riville. Järjestysnumeron hakkuukoneen tietojärjestelmässä saivat ainoastaan rungot, jotka täyttivät vähintään kuitupuun viiden senttimetrin minimiläpimittaan. Haasteita aiheuttivat kaksihaaraiset puut, joista kirjautui yhteensä kolme järjestysnumeroa samaan sijaintiin. Ensimmäinen runko kirjautui tyvestä, kaksi muuta haarautumiskohdasta. Aineiston analysointivaiheessa poistettiin haarapuut ja jätettiin ainoastaan tyviosa, koska hakkuulaitteen sijainnista haarapuun rekisteröitymishetkellä ei ollut varmuutta. Lisäksi muutamien puiden kohdalla kirjattiin ylös väärä järjestysnumero, mutta tästä aiheutuva virhe saatiin korjattua puukarttoja, puiden kirjautuneita sijaintitietoja sekä puun läpimittaa ja puulajia vertaamalla. Kaksi männikkökoealaa hakattiin pitämällä puomin jatkovarsi sisällä, muut kuusi koealaa jatkovartta normaalisti käyttäen. Hakkuukoneen kaatamia puita, joille oli maastolaserkeilauksissa tai maastomittauksissa paikannettu vastine, oli yhteensä 638. Maastossa paikannetuista vastinpuista 72 (11%) oli paikannettu bussolin ja mittanauhan avulla.

Hakkuukoneen tietojärjestelmään tallennettiin jokaisesta kaadetusta puusta puulaji, läpimitta 130 cm korkeudella kaatoleikkauksesta, käyttöosan pituus, järjestysnumero alusta alkaen koealoittain, hakkuukoneen sijainti WGS84-koordinaatistossa jokaisen puun kaatohetkellä sekä hakkuulaitteen sijainnin laskentaan tarvittavat tiedot jokaisen puun kaatohetkellä.



Kuva 2.2. Komatsu 931.1- hakkuukone. Hakkuulaite ympyröity punaisella. Puomin osa, josta jatkovarsi liikuu ulos, on merkattu vihreällä ([kuvan](#) ottaja MacDhòmhnail / CC BY).

2.1.3 Aineiston laskenta ja analyysi

Koordinaattien jälkilaskenta

Paikannetun hakkuulaitteen tallentamille puiden sijainneille tehtiin tarkkuuden parantamiseksi Metsäteho Oy:n kehittämä jälkilaskenta, jolla pyrittiin vähentämään hakkuukoneen GNSS-paikannuksen virhettä. Jälkilaskenta-algoritmi määrittä hakkuukoneen keskiarvoistetun ajouran ja tarkennetun kulkusuunnan suodatettujen hakkuukoneen sijaintien perusteella (Melkas ja Riecki 2017b). Hakkuulaitteen lopullinen sijainti laskettiin hyödyntäen jälkilaskenta-algoritmin tuloksia sekä koneen tallentamaa puomin suuntaa ja etäisyyttä. Koealoilta, jotka hakattiin ilman puomin jatkovarren käyttöä, siirrettiin hakkuulaitteen lopullista sijaintia hakkuukonetta kohden puomin jatkovarren puolikas, eli 1,65 m (Melkas ja Riecki 2017b).

Koordinaattien välinen euklidinen etäisyys ja RMSE

Evon koealoilta paikannetulla hakkuulaitteella kerättyä puiden sijaintitietoa sekä hakkuukoneen sijaintia verrattiin maastolaserkeilauksella paikannettujen puiden sijaintiin. Jokaiselle hakkuukoneen puukohtaiselle paikannukselle laskettiin tasolla euklidinen etäisyys puun todelliseen sijaintiin käyttäen yhtälöä 1,

$$d(p, q) = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (1)$$

jossa p_x on hakkuukoneen tai hakkuulaitteen x-koordinaatti puun kaatohetkellä, p_y on hakkuukoneen tai hakkuulaitteen y-koordinaatti puun kaatohetkellä, q_x on puun todellinen x-koordinaatti ja q_y on puun todellinen y-koordinaatti. Sijainnit ovat ETRS TM35FIN-koordinaatistossa. Euklidinen etäisyys on Pythagoran lauseen avulla laskettu kahden pisteen välinen etäisyys (Deza ja Deza 2014). Euklidisen etäisyyden lisäksi laskettiin x- ja y-koordinaatille keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) yhtälöllä 2,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2)$$

jossa \hat{y} on hakkuukoneen tai hakkuulaitteen x tai y-koordinaatti puun kaatohetkellä, y on puun todellinen x- tai y-koordinaatti, n on puiden määrä ja i on puun indeksinumero. Sijaintitarkkuuden arvioinnissa käytettyjen euklidisen etäisyyden ja RMSE:n yksikkö on metri.

Hakkuukoneen hakkaaman poistuman vertailu eri paikannusmenetelmillä

Paikannusmenetelmän vaikutusta koealaston pohjapinta-alan poistuman määrittämiseen tutkittiin jokaisen 32 x 32 metrin koealan sisään muodostettujen neljän ympyräkoelalan (säde yhdeksän metriä) avulla. Ympyräkoelajien sisältä hakattujen puiden pohjapinta-alan poistumaa verrattiin eri paikannusmenetelmillä laskemalla hakkuukoneen tai hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden poistumalle RMSE (yhtälö 3) ja harha (yhtälö 4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{vi} - p_{hi})^2} \quad (3)$$

$$harha = \frac{\sum_{i=1}^n p_{vi} - p_{hi}}{n} \quad (4)$$

Yhtälöissä 3 ja 4, p_v on koealan maastomittausten ja todellisten sijaintien avulla laskettu pohjapinta-alan kokonaispoistuma, p_h on hakkuukoneen tai hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden koealakohtainen pohjapinta-alan kokonaispoistuma, n on koealojen määrä ja i on koealojen indeksinumero. Pohjapinta-alan koealakohtainen poistuma laskettiin ympyräkoelalta hakattujen puiden pohjapinta-alojen summana.

Puiden pohjapinta-ala laskettiin hakkuukoneen mittauksista mallinnetun rinnankorkeusläpimitan avulla.

2.2 Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona

2.2.1 Tutkimusalue

Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon vaikutusta puustotulkinnan laatuun tutkittiin Suomen metsäkeskuksen Uudenmaan inventointialueelta kerätyllä hakkuukonetiedolla ja Suomen metsäkeskuksen maastokoealoilla. Suomen metsäkeskuksen koealat on kerätty huomioiden alueen metsien vaihtelu, joten Suomen metsäkeskuksen koealat kuvaavat tutkimusalueen metsien yleispiirteitä (taulukot 4 ja 5). Tutkimusalueen puulajijakauma on kuusivaltainen (mänty 37 %, kuusi 45 %, muu 18%). Uudenmaan alueella nuorten kasvatusmetsiköiden, varttuneiden kasvatusmetsiköiden ja uudistuskypsien metsiköiden osuudet metsämaan pinta-alasta ovat 14, 44 ja 21 prosenttia.

2.2.2 Aineiston kerääminen

Kaukokartoitusaineisto

Tutkimuksessa käytetty lentolaserkeilausaineisto ja ilmakehävaihtelu-aineisto on Blom Oy:n kesäkuun ja elokuun 2015 välisenä aikana keräämää. Aineistot kerättiin Suomen metsäkeskuksen puustotulkintahanketta varten yhdessä Maanmittauslaitoksen kanssa.

Lentolaserkeilauksen pulssitiheys oli keskimäärin 1,77 pulssia m² ja lentokorkeus keskimäärin 2050 metriä. Laserkeilauksessa käytetyt lento- ja keilausparametrit on esitetty taulukossa 2.2. Ilmakehävaihtelussa lentokorkeus oli keskimäärin 5022 metriä ja käytössä oli Vexcel UCXp- sekä S/N UC-SXp- kamerat. Vierekkäisten ilmakehävaihtelujen keskipisteiden etäisyys maanpinnalla oli 30 cm.

Maastokoeala-aineisto

Tutkimuksessa käytettiin Suomen metsäkeskuksen kesäkuun ja syyskuun 2015 välisenä aikana Uudenmaan inventointialueelta mittaamia maastokoealoja. Maastokoealoilta määritettiin koealakohtaisesti pääryhmä, alaryhmä, kasvupaikka, kasvupaikan lisämääre, kuivatustilanne, kehitysluokka, pääpuulaji ja toimenpidetarve. Jokaisesta rinnankorkeusläpimitaltaan yli 5 cm koealan puusta mitattiin läpimitat ja kirjattiin puuluokka (elävä tai kuollut). Koepuista mitattiin puulajiositteittain pohjapinta-

alamediaanipuun ikä ja pituus. Lisäksi koealan tärkeimmistä ositteista mitattiin 2 pituuden lisäkoepuuta (Suomen metsäkeskus 2014). Koealaotoksen sijoittelu perustui ryväotantaan, jolla pyritään kattamaan koko inventointialueen alaryhmien, pääpuulajien, pääpuulajien osuuksien, pohjapinta-alan ja keskiläpimitan vaihtelu mahdollisimman hyvin. Maastokoealat olivat säteeltään yhdeksän tai harvapuustoisessa metsässä 12,62 metriä ja niiden paikannustarkkuus on alle metri (Arbonaut Oy 2015).

Maastokoealoista hyödynnettiin nuorten kasvatusmetsiköiden, varttuneiden kasvatusmetsiköiden ja uudistuskypsien metsiköiden koealoja, jolloin niiden yhteismäärä oli 614. Maastokoealoista 197 oli nuorissa kasvatusmetsiköissä, 283 varttuneissa kasvatusmetsiköissä ja 174 koealaa uudistuskypsissä metsiköissä. Maastokoealojen puulajijakauma, kehitysluokkajakauma, sekä puustotunnukset on esitelty taulukoissa 2.3 ja 2.4.

Taulukko 2.2. Uudenmaan inventointialueelta kesällä 2015 kerätyn lentolaserkeilausaineiston parametrejä.

Parametri	Arvo	Yksikkö
<i>Lentonopeus keilauksen aikana</i>	311	solmua
<i>Lentokorkeus (keskimääräisestä maanpinnasta)</i>	2050	m
<i>Puoli-avauskulma</i>	20	°
<i>Keilaustaajuus</i>	45.3	Hz
<i>Pulssitaajuus</i>	114.6	kHz
<i>Sivupeitto</i>	20	%
<i>Keskimääräinen pistetiheys</i>	1.77	Kpl m ²
<i>Maksimipisteväli lentosuunnassa</i>	1.97	m
<i>Maksimipisteväli peilin liikkeen suunnassa</i>	1.97	m
<i>Multipulse käytössä</i>	kyllä	
<i>Signaali-kohinasuhde</i>	17.4	

Taulukko 2.3. Uudenmaan inventointialueelta mitattujen maastokoealojen (n=614) kehitysluokka- ja pääpuulajijakauma.

Kehitysluokka	Pääpuulaji (kpl)		
	<i>Mänty</i>	<i>Kuusi</i>	<i>Muu</i>
<i>Nuori kasvatusmetsikkö</i>	72	65	60
<i>Varttunut kasvatusmetsikkö</i>	108	97	33
<i>Uudistuskypsä metsikkö</i>	50	112	17
<i>Yhteensä</i>	230	274	110

Taulukko 2.4. Uudenmaan inventointialueelta mitattujen maastokoealojen (n=614) puustotunnusten keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit.

Kehitysluokka	D (cm)	H (m)	N (kpl ha⁻¹)	G (m² ha⁻¹)	V(m³ ha⁻¹)	V mänty (m³ ha⁻¹)	V kuusi (m³ ha⁻¹)	V lehtipuut (m³ ha⁻¹)
Keskiarvo (keskihajonta)								
<i>Nuori kasvatusmetsikkö</i>	12.5 (2.8)	11.8 (2.7)	2057.2 (1092.9)	17.3 (7.4)	107.3 (61.0)	38.5 (57.6)	31.5 (48.4)	37.2 (48.1)
<i>Varttunut kasvatusmetsikkö</i>	20.3 (3.4)	18.1 (2.6)	1059.5 (593.9)	24.2 (8.9)	214.7 (95.8)	80.9 (92.7)	90.9 (115.8)	42.9 (73.9)
<i>Uudistyskypsä kasvatusmetsikkö</i>	31.1 (5.5)	23.7 (3.4)	697.5 (411.2)	29.6 (9.7)	322.5 (128.9)	73.7 (100.2)	199.4 (175.4)	49.5 (74.7)
Vaihteluväli								
<i>Nuori kasvatusmetsikkö</i>	6.1 - 22.7	5.8 - 19.0	500.0 - 7742.0	2.5 - 37.6	9.5 - 318.2	0.0 - 249.5	0.0 - 260.7	0.0 - 304.1
<i>Varttunut kasvatusmetsikkö</i>	13.4 - 38.1	11.2 - 26.3	240.0 - 3379.0	8.4 - 62.7	67.8 - 728.1	0.0 - 367.3	0.0 - 597.9	0.0 - 728.1
<i>Uudistyskypsä kasvatusmetsikkö</i>	20.4 - 47.3	15.3 - 32.7	80.0 - 2751.0	6.4 - 72.2	57.9 - 924.0	0.0 - 417.4	0.0 - 924.0	0.0 - 469.0

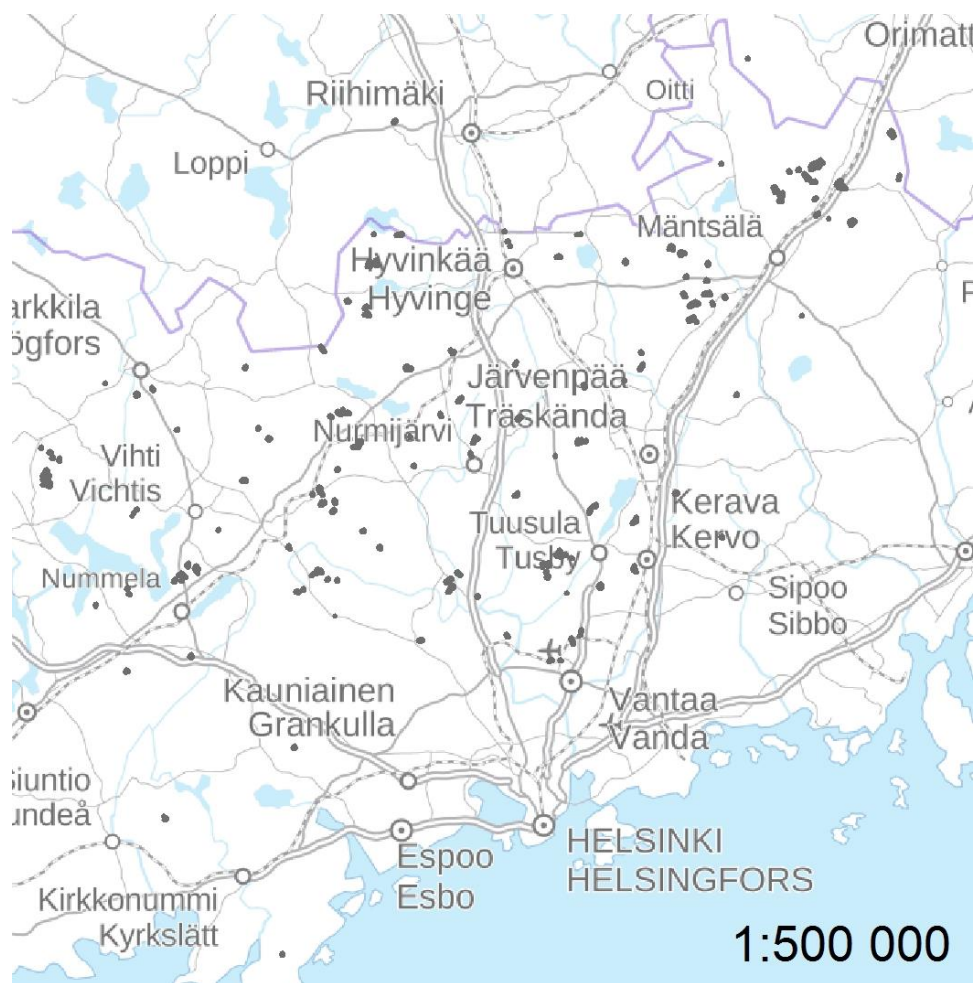
Hakkuukoneen keräämä puutieto

Testiaineistona tutkimuksessa käytettiin hakkuukoneen sijaintiin paikannettua puutietoa, jota kerättiin vuosien 2015 ja 2016 aikana viidellä hakkuukoneella. Hakkuukoneiden mittaamat tunnuksat on esitelty kappaleessa 1.1.5. Mittaustiedot sisältävät noin 250 000 runkoa ja 315 kuviota. Alle 0,5 hehtaarin suuriset leimikot, sekä muut kuin päätehakuuleimikot rajattiin aineistosta pois, jolloin jäljelle jäi 150 leimikkoa. Koneista neljä on Ponssen valmistamia ja yksi on John Deeren.

Puustotunnusten ennustemallien laadinnan opetusaineistona käytettiin Komatsu Forest 931.1- mallisen hakkuukoneen (kuva 2.2) vuoden 2016 alusta alkaen keräämää hakkuukoneen hakkuulaitteella paikannettua puutietoa. Hakkuukoneen keräämässä aineistossa päätehakuuleimikoita oli yhteensä kahdeksan, joilla puita oli yhteensä 8820. Hakkuukoneella kerätyn puutiedon yhteenveto on esitetty taulukossa 2.5. Tutkimuksessa käytettyjen leimikoiden maantieteellinen jakautuminen on esitetty kuvassa 2.3.

Taulukko 2.5. Hakkuukoneleimikoiden puustotiedot leimikon pääpuulajin mukaan keskiarvotunnuksina. Koko testiaineisto (n=150) ja siitä rajattu testiaineisto (n=78) koostuu hakkuukoneen sijaintiin paikannetusta puutiedosta. Opetusaineisto (n=8) koostuu hakkuukoneen hakkuulaitteen sijaintiin paikannetusta puutiedosta.

Pää- puulaji	G	N	D	H	V	Vtukkan	Mänty %	Kuusi %	Lehtipu u %
Keskiarvot									
<i>Koko testiaineisto</i>									
<i>Mänty (n=9)</i>	21.1	652	25.4	20.2	205.8	142.1	59%	20%	21%
<i>Kuusi (n=131)</i>	24.9	576	28.9	22.9	278.9	210.4	7%	78%	15%
<i>Lehtipuu (n=10)</i>	20.5	572	26.1	21.1	213.1	141.9	12%	32%	57%
<i>Rajattu testiaineisto</i>									
<i>Kuusi (n=76)</i>	24.3	572	28.1	22.6	268.4	200.3	8%	75%	17%
<i>Lehtipuu (n=2)</i>	20.2	474	26.3	21.9	213.5	145.6	7%	43%	50%
<i>Opetusaineisto</i>									
<i>Mänty (n=1)</i>	11.2	540	19.3	16.1	89.4	37.0	55%	14%	31%
<i>Kuusi (n=7)</i>	27.2	645	29.7	23.8	314.3	237.9	8%	90%	8%
Keskihajonta									
<i>Koko testiaineisto</i>									
<i>Mänty</i>	6.2	259	3.6	2.4	64.5	55.0	9%	9%	10%
<i>Kuusi</i>	5.8	167	4.4	2.3	77.4	72.1	8%	14%	11%
<i>Lehtipuu</i>	9.9	238	8.3	4.2	121.8	108.4	12%	15%	17%
<i>Rajattu testiaineisto</i>									
<i>Kuusi</i>	3.7	97	3.0	1.7	52.5	49.8	9%	13%	11%
<i>Lehtipuu</i>	4.0	4	2.6	2.1	61.1	59.9	9%	2%	7%
<i>Opetusaineisto</i>									
<i>Mänty</i>									
<i>Kuusi</i>	3.3	161	5.3	2.1	50.7	52.1	2%	7%	7%
Vaihteluväli									
<i>Koko testiaineisto</i>									
<i>Mänty</i>	11.2- 29.6	304- 1077	18.5- 31.6	16.5-24.1	94.1- 288.4	40.9- 205.1	50- 70%	10-30%	10-40%
<i>Kuusi</i>	1.2- 41.3	33-940	21.3- 46.8	18.4-29.5	12.9- 552	9.1- 490.3	0-40%	100%	0-50%
<i>Lehtipuu</i>	8.3- 38.6	336- 1023	14.9- 41.2	12.8-26.2	52.7- 427.4	2.8-323	0-30%	0-50%	100%
<i>Rajattu testiaineisto</i>									
<i>Kuusi</i>	15.8- 31.4	395-791	22.7- 38.6	18.7-25.8	152.2- 377.9	89.8- 315.6	0-40%	40- 100%	0-50%
<i>Lehtipuu</i>	17.4- 23	471-477	24.5- 28.2	20.4-23.4	170.3- 256.7	103.2- 187.9	0-10%	40-40%	50-60%
<i>Opetusaineisto</i>									
<i>Mänty</i>	11.2- 11.2	540-540	19.3- 19.3	16.1-16.1	89.4- 89.4	37-37	50%	10-10%	30-30%
<i>Kuusi</i>	22.9- 32	431-897	25.1- 37.4	21.4-26.1	251.4- 397.9	177.9- 319.1	0-10%	80- 100%	0-20%
Koko testiaineiston leimikkokoko (ha)					Rajatun testiaineiston leimikkokoko (ha)				
<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskihajonta</i>	<i>Vaihteluväli</i>	<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskihajonta</i>	<i>Vaihteluväli</i>	<i>Keskiarvo</i>	<i>Keskihajonta</i>	<i>Vaihteluväli</i>	
2,3	1,9	0,5-12,2	2,5	1,9	0,5-9,0	1,3	1,0	0,2-3,1	



Kuva 2.3. Tutkimuksessa käytettyjen opetus- ja testileimikoiden (n=158) maantieteellinen jakautuminen.

2.2.3 Aineiston laskenta ja analyysi

Hakkuukoneen mittalaitteilla kerätyn puutiedon paikannustarkkuuden vaikutusta laserkeilausperusteiseen puustotulkintaan selvitettiin kuvassa 2.4 esitellyllä menetelmällä. Puutiedoissa yksittäisen puun sijainti oli määritetty joko hakkuukoneen sijaintiin tai hakkuulaitteen sijaintiin, joka oli määritetty suhteessa hakkuukoneen sijaintiin. Ei-parametrinen k-MSN- menetelmää käytettiin estimoimaan puustotunnukset yhteensä 150 testileimikolle käyttäen mallien opetusaineistona hakkuukoneella päätehakkuuleimikoilta kerättyä puutietoa ja erilaisia maastokoealojen yhdistelmiä. Leimikkotunnukset ennustettiin erikseen käyttäen opetusaineistona hakkuukoneen sijaintiin paikannettujen puiden joukkoon muodostettuja koealoja, sekä hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden joukkoon muodostettuja koealoja.

	Testiaineisto	Opetusaineisto	
<i>Työvaihe</i>	<i>Hakkuukoneen sijaintiin paikannettu puutieto</i>	<i>Hakkuukoneen sijaintiin paikannettu puutieto</i>	<i>Hakkuulaitteen sijaintiin paikannettu puutieto</i>
1	Leimikoiden muodostaminen ja puustotunnusten laskenta leimikoille	Leimikoiden muodostaminen ja puustotunnusten laskenta leimikoille	Leimikoiden muodostaminen ja puustotunnusten laskenta leimikoille
2		Koealojen muodostaminen	Koealojen muodostaminen
3		Puustotunnusten laskenta koealoille	Puustotunnusten laskenta koealoille
4		Laserpiirteiden ja ilmakuva- piirteiden laskenta koealoille ja koealayhdistelmien luonti	Laserpiirteiden ja ilmakuva- piirteiden laskenta koealoille ja koealayhdistelmien luonti
5		Selittäjävalinta k-MSN-malleihin	Selittäjävalinta k-MSN-malleihin
6	Hilan luonti testileimikoiden päälle ja kaukokartoituspiirteiden laskenta hilaruuduille		
7		Puustotunnusten ennustaminen testiaineiston hilaruuduille työvaiheen 5 malleilla	Puustotunnusten ennustaminen testiaineiston hilaruuduille työvaiheen 5 malleilla
8		Puustotunnusten yhdistäminen hilalta leimikkotasolle	Puustotunnusten yhdistäminen hilalta leimikkotasolle
9	Leimikkotason ennusteen vertailu paikannustapojen ja käytettyjen koealojen välillä		

Kuva 2.4. Menetelmä, jolla selvitettiin tarkennetun hakkuukonetiedon vaikutus puustotulkintaan. Opetusleimikoille, joilta hakatut puut oli paikannettu sekä hakkuukoneen että hakkuulaitteen sijaintiin, tehtiin kohdat 1-5 ja 7-8 kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla käyttäen puiden sijaintina hakkuukoneen sijaintia, toisella kerralla käyttäen puiden sijaintina hakkuulaitteen sijaintia. Testileimikoille, joilta hakatut puut oli paikannettu hakkuukoneen sijaintiin, tehtiin ainoastaa kohdat 1 ja 6. Kohdissa 7-8 laskemisessa käytettiin testileimikoiden päälle muodostettuja hilaruutuja, joille oli ennustettu puustotunnukset erikseen kahdella tavalla paikannettua puutietoa käyttäen.

Leimikoiden muodostaminen ja puustotietojen laskenta leimikoille ja hakkuukonekoealoille

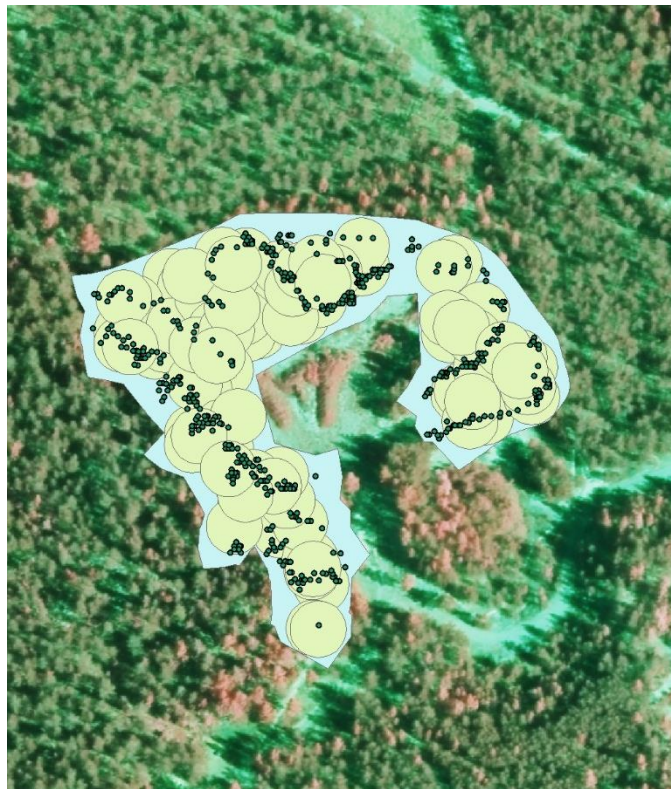
Menetelmän ensimmäisessä vaiheessa muodostettiin opetus- ja testileimikoille leimikkorajat ja laskettiin hakkuukoneelta saatujen hakattujen puiden tietojen perusteella leimikkotason kokonaistunnukset ja puulajiositteiset tunnuksat. Leimikkorajojen muodostamiseen käytettiin Melkkaan ja Riekin (2017) hakattujen puiden sijainteihin perustuvaa kuvioraja-algoritmia. Paikannetulla hakkuulaitteella varustetun hakkuukoneen hakkaamien leimikoiden rajat muodostettiin erikseen hakkuukoneen sijaintiin paikannetuilla puilla sekä hakkuulaitteen sijaintiin paikannetuilla puilla.

Leimikoille laskettaviin kokonaistunnuksiin kuuluivat pohjapinta-ala, runkoluku, pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (hakkuukoneen mittauksiin sovitulta runkokäyrältä saatu rinnankorkeusläpimitta), hakkuukonemittauksiin sovitetulla polynomikorjatulla runkokäyrällä (Laasasenaho 1982) laskettu pohjapinta-alalla painotettu keskipituus, tilavuus, tukkitilavuus ja kuitutilavuus. Samat tunnuksat laskettiin lisäksi puulajiositteittain. Läpimittoja ja pituutta lukuun ottamatta tunnuksat ovat hehtaarikohtaisia. Puustotietojen laskennan ohessa poistettiin leimikkoaineistosta leimikot, joiden hakkuutapa oli muu kuin päätehakkuu. Metsäteho Oy teki rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden laskennan vaatimat runkokäyräsovitukset.

Menetelmän toisessa vaiheessa luotiin opetusleimikoille (n=8) 100 koealaa satunnaisesti sijainteihin. Koealakoon vaikutuksen testaamiseksi muodostettiin koealat neljä kertaa, jolloin joka kerralla asetettiin koealoille eri säde. Ensimmäisten koealojen säde oli yhdeksän metriä, joka pinta-alana vastaa maastokoealan pinta-alaa. Muut koealat olivat säteiltään 12,73 metriä, 15,56 metriä ja 18 metriä. Säteet määräytyivät lisäämällä edellisen koealakoon pinta-alaan 254,47 neliömetriä, eli käytetyn tavallisen maastokoealan pinta-ala. Koealojen muodostuminen kokonaan leimikon sisälle varmistettiin pienentämällä leimikkoa väliaikaisesti sisäänpäin koealan säteen verran. Leimikoiden pienentäminen johti paikannetun hakkuulaitteen hakkaamalla leimikoilla yhden leimikon poistamiseen, kun koealakoko oli 15,59 ja 18 metriä. Leimikot poistettiin, koska niissä oli kohtia, joissa leimikon muoto ei sallinut leimikkorajan vetämistä koealan säteen verran sisäänpäin.

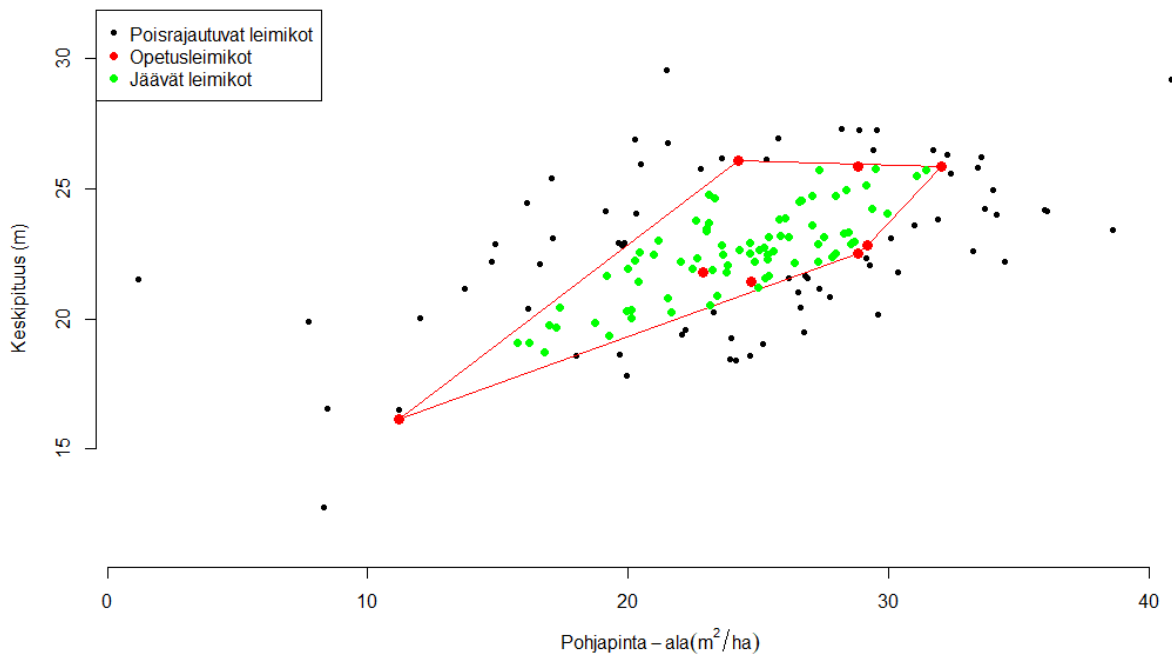
Menetelmän kolmannessa vaiheessa laskettiin muodostetuille koealoille puustotiedot puutiedoista, joiden puittainen sijainti oli määritetty kahdella eri tavalla. Puustotietojen

laskentavaiheessa hakkuukoneella kerätyn puutiedon sijaintitarkkuus vaikuttaa koealojen puustotunnuksiin, koska yksittäiset puut määritetään kuuluvan sille koealalle, jonka alueelle ne ovat paikannettu. Hakkuukoneen sijaintiin paikannetut puut sijaitsevat ajourilla, jolloin ne eivät hajoa tasaisesti koealoille, vaan osalla koealoista puiden määrä yliarvioituu ja osalla aliarvioituu (kuva 2.5). Puustotietojen laskenta koealoille tehtiin samalla menetelmällä kuin leimikoille aiemmassa vaiheessa. Virhettä hakkuukonekoealojen puustotunnuksiin aiheuttaa oletettavasti puiden paikannustarkkuus. Mitä epätarkempi puiden sijaintitieto on, sitä todennäköisemmin ne paikantuvat luotujen hakkuukonealojen sisälle, vaikka todellisuudessa sijaitsevat sen ulkopuolella. Vastaavasti epätarkalla puun sijaintitiedolla koealalla sijaitseva puu voi paikantua koealan ulkopuolelle.



Kuva 2.5. Säteeltään yhdeksän metriä olevat 100 koealaa opetusleimikolla, sekä hakkuukoneen sijaintiin paikannetut puut.

Koska opetusaineisto (800 koealaa) sisälsi vain kahdeksan päätehakkuuleimikkoa, muodostettiin kaksi eri testiaineistoa, jotta opetusaineiston vähäinen määrä testiaineistoon verrattuna ei vaikuttaisi leimikkotunnusten ennustustarkkuuteen, vaan hakkuukoneen sijainnin ja paikannetun hakkuulaitteen välinen ero näkyisi tuloksissa. Laajempi testiaineisto käsitti kaikki 150 päätehakkuuleimikkoa. Toinen testiaineisto rajattiin opetusaineiston leimikkotason pohjapinta-alan ja pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden mukaan. Rajatusta testiaineistosta poistettiin ne leimikot, joiden pohjapinta-ala ja pohjapinta-alalla painotettu keskipituus ei sisällynyt opetusaineiston leimikkotason vaihteluvälille (kuva 2.6). Rajauksen jälkeen testiaineistoon jäi yhteensä 78 leimikkoa. Testiaineistojen ja opetusaineiston puustotiedot on esitetty taulukossa 2.5.



Kuva 2.6. Testiaineiston rajaaminen opetusaineiston keskipituuden ja pohjapinta-alan vaihtelun mukaan. Opetusaineiston ääriarvojen mukaan piirretty punainen monikulmio kuvaa opetusaineiston vaihtelua, jonka ulkopuolelle jääneet testileimikot rajattiin pois toisesta testiaineistosta.

Laserpiirteiden laskenta ja koealayhdistelmien luonti

Menetelmän neljännessä vaiheessa paikannetulla hakkuulaitteella hakatuille leimikoille muodostetuille koealoille laskettiin laser- ja ilmakuva- ja piirteet ja luotiin erilaiset hakkuukonekoealoista ja maastokoealoista koostuvat yhdistelmät. Piirteiden laskentaan käytettiin ArboLidar- ohjelmistoa ja ne perustuivat aiempiin tutkimuksiin (Haralick ym. 1973; Lowe 1999; Næsset 2002; Dalal ja Triggs 2005; Packalén ym. 2009; Junttila ym. 2010). Lasketut piirteet ja niiden selitykset on esitetty liitteissä 1 ja 2.

Laserpiirteiden laskennan jälkeen luotiin 12 erilaista koealayhdistelmää puustotunnusten ennustemallien laatimista varten. Koealayhdistelmät on esitelty taulukossa 2.6. Eri yhdistelmiä käyttämällä pystyttiin vertailemaan koealakoon ja maastokoealojen ja hakkuukoneella kerätyn puutiedon yhteiskäytön vaikutusta puustotulkinnassa.

Taulukko 2.6. Muodostetut koealayhdistelmät puustotunnusten ennustemallien laadintaa varten. Viiva kehitysluokkasarakkeessa tarkoittaa, että maastokoealoja ei ole mukana kyseisessä koealajoukossa. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Koealan säde (m)	Maastokoealojen kehitysluokat
9	-
9	02, 03, 04
9	04
12.73	-
12.73	02, 03, 04
12.73	04
15.59	-
15.59	02, 03, 04
15.59	04
18	-
18	02, 03, 04
18	04
<i>Ei hakkuukonealoja</i>	02, 03, 04
<i>Ei hakkuukonealoja</i>	04

Selittäjävalinta

Menetelmän viidennessä vaiheessa tehtiin eri opetusaineistoille k-MSN-mallien selittäjävalinta. Selittäjävalinta tehtiin korrelaatioanalyysin avulla taulukon 2.6 mukaisille koealayhdistelmille kahteen kertaan. Ensin käyttäen koealoja, joiden puustotiedot oli laskettu hakkuukoneen sijaintiin paikannetuilla puilla, toiseksi käyttäen koealoja, joiden puustotiedot oli laskettu hakkuulaitteen sijaintiin paikannetuilla puilla.

Yhteensä 271 selittäjäkandidaattia jaettiin puuston pituutta, tiheyttä, pituuden hajontaa tai puulajien välistä eroa kuvaaviin piirteisiin. Puuston pituutta kuvaavia piirteitä oli yhteensä 12, puuston tiheyttä kuvaavia piirteitä 11, puuston pituuden hajontaa kuvaavia piirteitä yksi ja puulajien välistä eroa kuvaavia piirteitä yhteensä 246. Pituutta, tiheyttä ja hajontaa kuvaavat piirteet koostuivat pistepilven korkeusjakaumaa kuvaavista piirteistä, puulajien välistä eroa kuvaavat piirteet koostuivat ilmakuvilta lasketuista tekstuuri ja sävyarvopiirteistä sekä värjätystä laserkeilauspistepilvestä lasketuista tunnuksista.

Laserkeilauskaikujen korkeusjakaumaa kuvaavilla piirteillä ennustetaan puustotunnuksiin vaikuttavaa puuston rakennetta. Puuston rakenteesta saadaan tietoa tarkastelemalla puuston pituutta, pituuden hajontaa ja latvuspeittävyyttä (Lefsky ym. 2005). Korkeusjakaumaa kuvaavista piirteistä malleihin valittiin kolme piirrettä. Puuston pituutta kuvaavaksi luokitelluista piirteistä valittiin voimakkaimmin koealojen puuston pituuden kanssa korreloiva piirre ja puuston tiheyttä kuvaavaksi luokitelluista piirteistä valittiin voimakkaimmin koealojen puuston pohjapinta-alan kanssa korreloiva piirre. Pituuden hajontaa kuvaavia piirteitä oli vain yksi, jolloin se valittiin jokaiseen malliin.

Ilmakuva- ja värjättyjen laserkeilauspiirteiden valintaa varten laskettiin koealoille puulajeittaiset osuudet kokonaistilavuudesta. Piirteiden ja puulajeittaisten tilavuusosuuksien välisten korrelaatioiden avulla valittiin ensimmäisenä parhaiten männyn kuusesta erottava piirre, toisena männyn lehtipuista erottava piirre sekä kolmantena kuusen lehtipuista erottava piirre. Mikäli korrelaatioiden perusteella oli valikoitumassa piirre, jonka korrelaatio toisen tarkasteltavan puulajin kanssa oli alle 0,2, valittiin malliin seuraavaksi parhaiten puulajit erottava piirre.

Hilan luonti, puustotunnusten ennustaminen hilaruudukolle ja puustotunnusten yhdistäminen hilalta leimikkotasolle

Testileimikoille (taulukko 2.5) luotiin puustotietojen ennustamista varten hilaruudukko, jonka ruutukoko oli 16 x 16 m (256 m²) ja vastasi näin pinta-alaltaan maastokoealojen pinta-alaa. Kuvion reunoille jäävien hilaruutujen vähimmäispinta-alaksi asetettiin 128 m². Mikäli hilaruutu jäi raja-arvoa pienemmäksi, sulautettiin se viereiseen ruutuun.

Puustotunnusten ennustaminen hilaruudukolle tehtiin k-MSN-menetelmällä. K-MSN-menetelmä on muokattu versio Moeur ja Stage (1995) kehittämästä MSN-menetelmästä. K-MSN-menetelmässä tuntemattomille selitettäville muuttujille haetaan opetusaineistosta arvot selittävien muuttujien perusteella valittavien k:n lähimmän naapurin avulla. Etäisyys lähimpiin naapureihin määritetään kanonisten korrelaatioiden ja euklidisen etäisyyden avulla. K:n lähimmän naapurin painokerroin määräytyy sen etäisyyden käänteislukuna. Tutkimuksessa käytetty naapureiden määrä oli viisi. Useissa tutkimuksissa optimaalinen naapurien määrä on vaihdellut 3 ja 10 välillä (Packalén ja Maltamo 2007). Puustotunnusten ennustamisen jälkeen hilaruutukohtaiset puustotunnukset yhdistettiin leimikkotason ennusteiksi. Kahden eri testiaineiston (taulukko 2.5) sisältämien hilaruutujen ennustetut hehtaarikohtaiset pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus ja tukkitilavuus muutettiin hilaruutukohtaisiksi, laskettiin leimikoittain yhteen ja lopuksi laskettiin hehtaarikohtaisiksi jakamalla leimikon pinta-alalla. Rinnankorkeusläpimitta ja keskipituus laskettiin leimikoittain hilaruutujen pohjapinta-alalla painotettuna keskiarvona.

Leimikkotason ennusteen vertailu

Leimikkotason ennusteita ja hakkuukoneen leimikoilta mittaaman puutiedon perusteella laskettuja puustotunnuksia verrattiin RMSE:n (yhtälö 3), leimikkojen keskiarvolla suhteutetun RMSE:n (yhtälö 4), harhan (yhtälö 5) ja leimikkojen keskiarvolla suhteutetun harhan (yhtälö 6) avulla.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$RMSE - \% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\bar{y}} \quad (6)$$

$$harha = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{n} \quad (7)$$

$$harha - \% = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{n}}{\bar{y}} \quad (8)$$

Yhtälöissä 5-8 y on hakkuukoneen mittauksista laskettu puustotunnuksen arvo, \hat{y} on k-MSN -mallilla ennustettu puustotunnuksen arvo, \bar{y} on hakkuukoneen mittauksista lasketun puustotunnuksen keskiarvo kaikilta leimikoilta, n on leimikoiden määrä ja i on leimikon indeksinumero. Tarkkuuden arvioinnissa käytettävät tilastolliset tunnusluvut laskettiin sekä hakkuukoneen sijaintiin että hakkuulaitteen sijaintiin paikannetuilla puilla (hakkuukonekoealoilla) tehdyille puustotulkinnoille. Lisäksi hakkuukoneaineiston avulla tehtyä puustotulkintaa verrattiin pelkkien maastokoealojen avulla tehtyyn puustotulkintaan sekä hakkuukoneaineiston ja maastokoealojen yhdistelmällä tehtyihin puustotulkintoihin.

3. TULOKSET

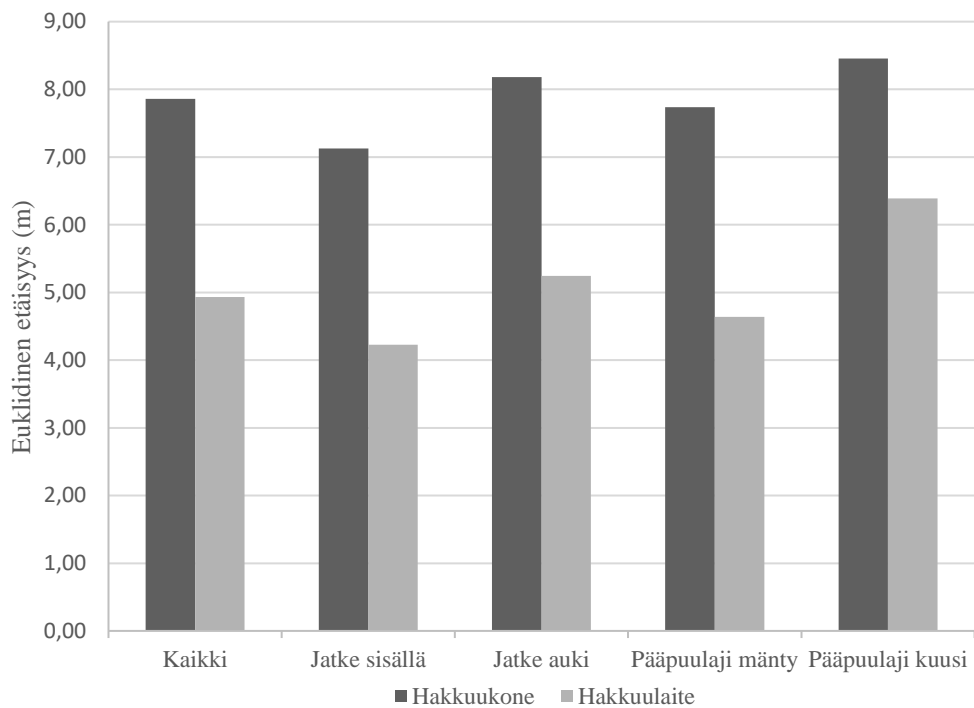
3.1 Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutus yksittäisen puun sijainnin määrittämiseen ja puittaisista tiedoista laskettuun hakkuupoistuman pohjapinta-alaan

3.1.1 Puiden sijainnin määrittämisen tarkkuus

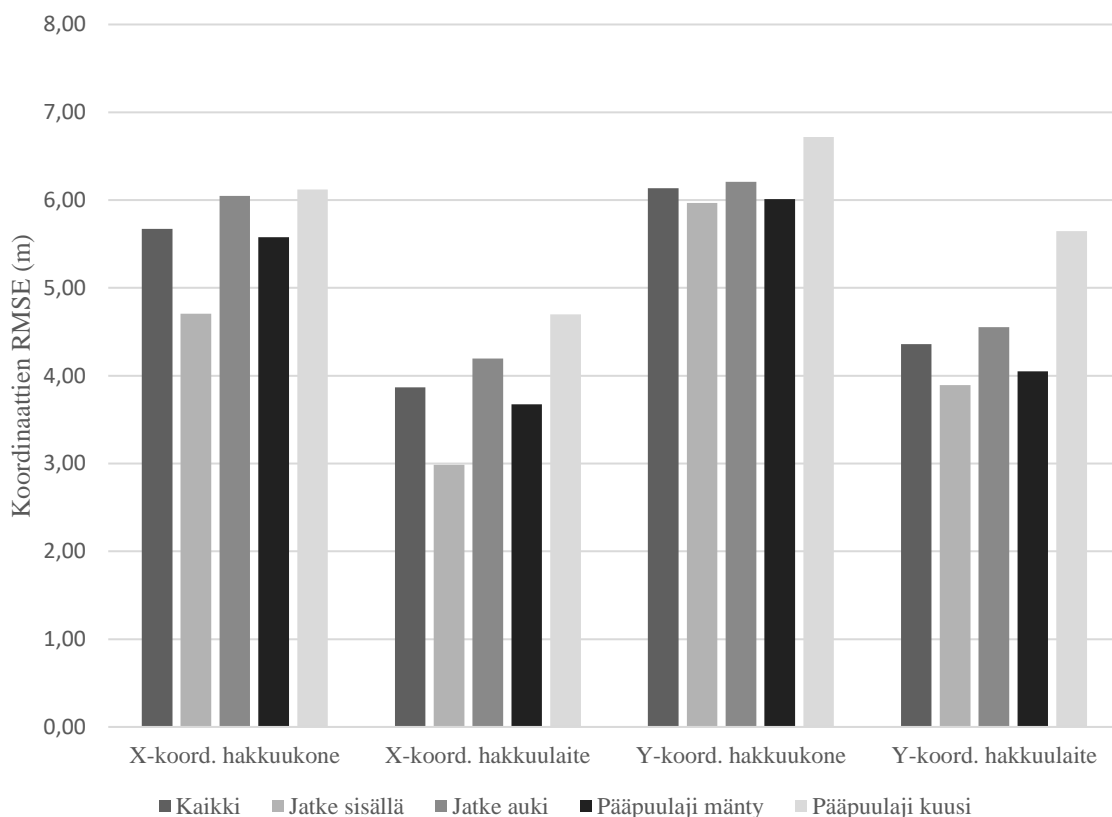
Hakkuukoneen ja hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden ja puiden todellisten sijaintien vertailussa (taulukko 3.1, kuvat 3.1 ja 3.2) euklidiset etäisyydet hakkuulaitteen - ja todellisten sijaintien välillä sekä hakkuukoneen - ja todellisten sijaintien välillä olivat kaikkia kahdeksaa koealaa tarkastellessa keskimäärin 4,93 ja 7,86 metriä. Puiden paikantaminen hakkuulaitteen sijaintiin paransi yksittäisen puun paikannustarkkuutta keskimäärin 2,93 metriä. Puomin jatkovarsi sisällä hakatuilla koealoilla euklidiset etäisyydet olivat vastaavasti 4,23 ja 7,12 metriä, jolloin hakkuulaitteen paikannus paransi sijaintitarkkuutta 2,90 metriä. Puomin jatkovartta normaalisti käyttäen euklidiset etäisyydet hakkuulaitteen – ja todellisten sijaintien sekä hakkuukoneen – ja todellisten sijaintien välillä olivat 5,24 ja 8,18 metriä, jolloin hakkuulaitteen paikannus paransi sijaintitarkkuutta 2,94 metriä. Koealoilla, joissa pääpuulaji oli kuusi, hakkuulaitteen sijaintien ja puiden todellisten sijaintien sekä hakkuukoneen sijaintien ja puiden todellisten sijaintien väliset euklidiset etäisyydet olivat keskimäärin 6,39 ja 8,46 metriä, jolloin hakkuulaitteen paikannus paransi yksittäisen puun paikannustarkkuutta 2,07 metriä. Koealoilla, joilla pääpuulaji oli mänty, olivat vastaavat euklidiset etäisyydet 4,64 ja 7,74 metriä, joilloin parannus oli 3,10 metriä. Kuvissa 3.3-3.5 on esitetty hakkuukoneen sijaintien ja hakkuulaitteen sijaintien erot puiden todellisiin sijainteihin koealalla 1018. Koealalla 1018 hakkuulaitteen sijaintien ja puiden todellisten sijaintien välinen keskimääräinen euklidinen etäisyys oli 3,30 metriä pienempi kuin hakkuukoneen sijaintien ja puiden todellisten sijaintien välinen etäisyys. X- ja Y-koordinaattien RMSE:t olivat hakkuulaitteen sijainteja käyttäen keskimäärin 1,80 ja 1,77 metriä pienemmät kuin hakkuukoneen sijainteja käyttäen. Koealan pääpuulaji vaikutti puomin jatkeen käyttöä enemmän yksittäisen puun paikannustarkkuuteen. Kahdella kuusikoealalla hakkuulaitteen ja hakkuukoneen sijaintien euklidinen etäisyys puiden todellisiin sijainteihin oli mäntykoealoja suurempi, mutta myös hakkuulaitteen paikannuksen tuoma parannus sijaintitarkkuuteen oli kuusikoealoilla mäntykoealoja vähäisempi.

Taulukko 3.1. Evon kahdeksalla koealalla tehdyn paikannustarkkuustutkimuksen tulokset. Euklidiset etäisyydet (EE, m) sekä X- ja Y- koordinaattien RMSE (m) on laskettu eri paikannusmenetelmien ja puiden todellisten sijaintien välillä.

Sarja	EE hakkuukone	EE hakkuulaite	Erotus hakkuukone - hakkuulaite	X-koord. RMSE hakkuukone	X-koord. RMSE hakkuulaite	Erotus hakkuukone - hakkuulaite	Y-koord. RMSE hakkuukone	Y-koord. RMSE hakkuulaite	Erotus hakkuukone - hakkuulaite
<i>Kaikki</i>	7.86	4.93	2.93	5.67	3.87	1.80	6.13	4.36	1.77
<i>Jatke sisällä</i>	7.12	4.23	2.90	4.71	2.98	1.72	5.97	3.89	2.07
<i>Jatke auki</i>	8.18	5.24	2.94	6.05	4.20	1.85	6.21	4.55	1.66
<i>Pääpuulaji mänty</i>	7.74	4.64	3.10	5.58	3.68	1.90	6.01	4.05	1.96
<i>Pääpuulaji kuusi</i>	8.46	6.39	2.07	6.12	4.70	1.42	6.72	5.65	1.07



Kuva 3.1. Hakkuukoneen sijainnin ja hakkuulaitteen sijainnin keskimääräinen euklidinen etäisyys (m) Evon kahdeksalla koealalla sijaitseviin puihin, joiden sijainti oli paikannettu RTK-mittausten ja maastolaserkeilausten tai bussolin ja mittaunauhan avulla. Kahdella koealoista hakkuukoneen puomin jatkovartta ei käytetty ollenkaan, mutta kuudella jatkovartta käytettiin normaalisti. Kuudella koealalla pääpuulaji oli mänty ja kahdella pääpuulaji oli kuusi.



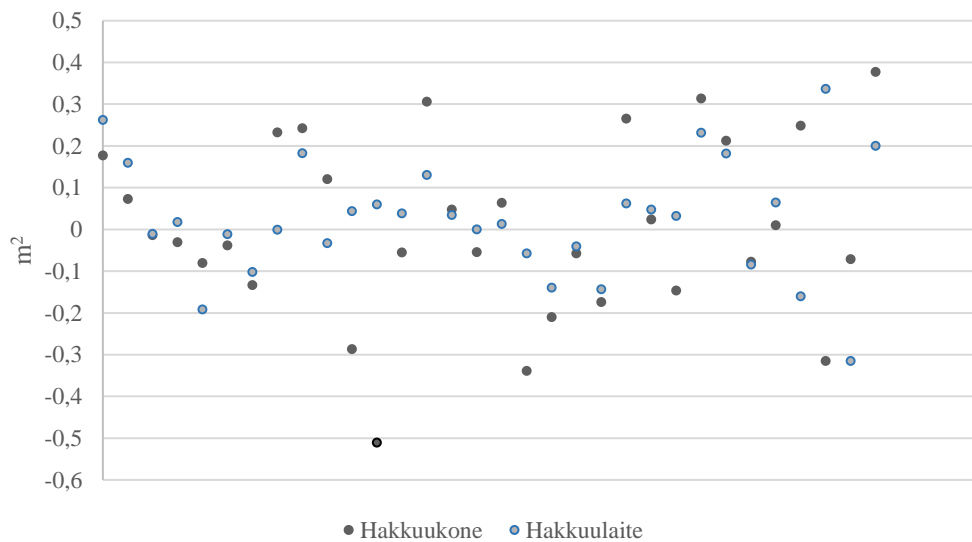
Kuva 3.2. Hakkuukoneen sijainnin ja hakkuulaitteen sijainnin sekä RTK-mittausten ja maastolaserkeilausten tai bussolin ja mittanauhan avulla paikannettujen puiden X- ja Y-koordinaattien keskimääräinen RMSE (m). Kahdeksasta koealasta kahdella hakkuukoneen puomin jatkovartta ei käytetty ollenkaan, mutta kuudella jatkovartta käytettiin normaalisti. Kuudella koealalla pääpuulaji oli mänty ja kahdella pääpuulaji oli kuusi.

3.1.2 Hakkuukoneen hakkaaman poistuman vertailu eri paikannusmenetelmillä

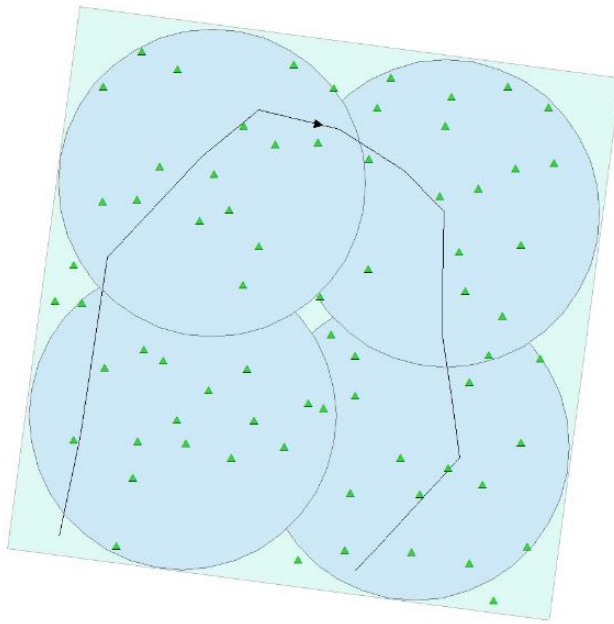
Säteeltään yhdeksän metrin ympyräkoelajen pohjapinta-alan poistumaa vertailtaessa hakkuulaitteen ja hakkuukoneen sijaintiin paikannettujen puiden poistumien RMSE:t olivat 23 % ja 35 %. Hakkuulaitteen käyttö puiden paikantamiseen tuotti 12 % -yksikköä pienemmän RMSE:n kuin hakkuukoneen sijainnin käyttö yksittäisten puiden paikannusmenetelmänä. Menetelmien harhat olivat 4 % ja 1 %. Todellinen poistuma muodostettujen koealojen alueelta oli yhteensä 19,1 m², hakkuukoneen sijaintiin paikannettujen puiden poistuma oli 19,0 m², mutta hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden poistuma oli 18,3 m². Pohjapinta-alan poistuman vertailu on esitetty taulukossa 3.2. Koealakohtainen poistuma eri paikannusmenetelmillä on esitetty kuvassa 3.3.

Taulukko 3.2. Pohjapinta-alan poistuma yhdeksän metrin ympyräkoealoista eri paikannusmenetelmillä. Hakkuukoneen kaatamat puut paikannettu joko hakkuukoneen sijaintiin tai hakkuulaitteen sijaintiin. Puiden todelliset sijainnit on paikannettu maastolaserkeilaamalla, RTK-mittauksilla sekä mittaunauhalla ja bussolilla.

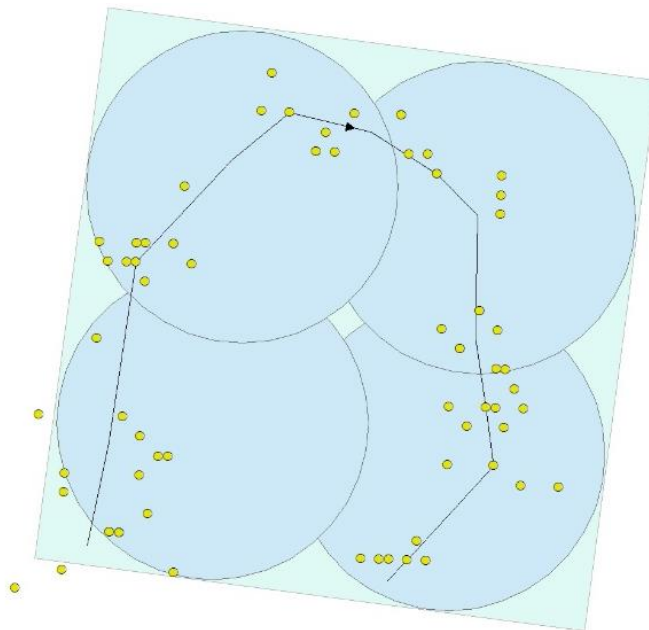
Paikannusmenetelmä	Pohjapinta-alan poistuma yhteensä (m ²)	Pohjapinta-alan koealakohtainen poistuma keskimäärin (m ²)	RMSE (RMSE-%)	harha (harha-%)
<i>Maastomittaukset (RTK ja TLS)</i>	19.1	0.598		
<i>Hakkuukone</i>	19.0	0.594	0.2 (35)	0.0 (1)
<i>Hakkuulaite</i>	18.3	0.573	0.1 (23)	0.0 (4)



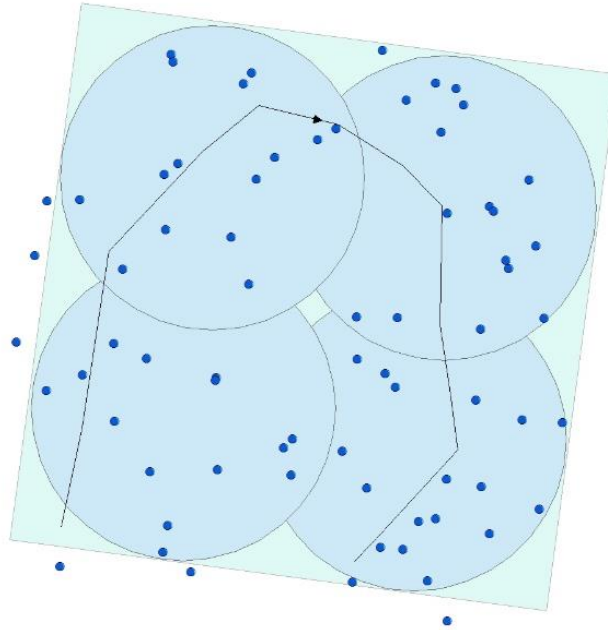
Kuva 3.3. Pohjapinta-alan poistuman (m²) koealakohtainen (n=32) todellisen poistuman ja hakkuukoneen ta hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden poistuman erotus.



Kuva 3.4. Maastolaserkeilaamalla, RTK-mittauksilla sekä mittanauhalla ja bussolilla paikannetut puiden todelliset sijainnit, poistuman vertailua varten muodostetut ympyräkoealat ($r=9\text{ m}$) ja korjuu-ura koealalla 1018.



Kuva 3.5. Hakkuukoneen sijaintiin paikannetut puut, poistuman vertailua varten muodostetut ympyräkoealat ($r=9\text{ m}$) ja korjuu-ura koealalla 1018.



Kuva 3.6. Hakkuulaitteen sijaintiin paikannetut puut, poistuman vertailua varten muodostetut ympyräkoealat ($r=9\text{m}$) ja korjuu-ura koealalla 1018.

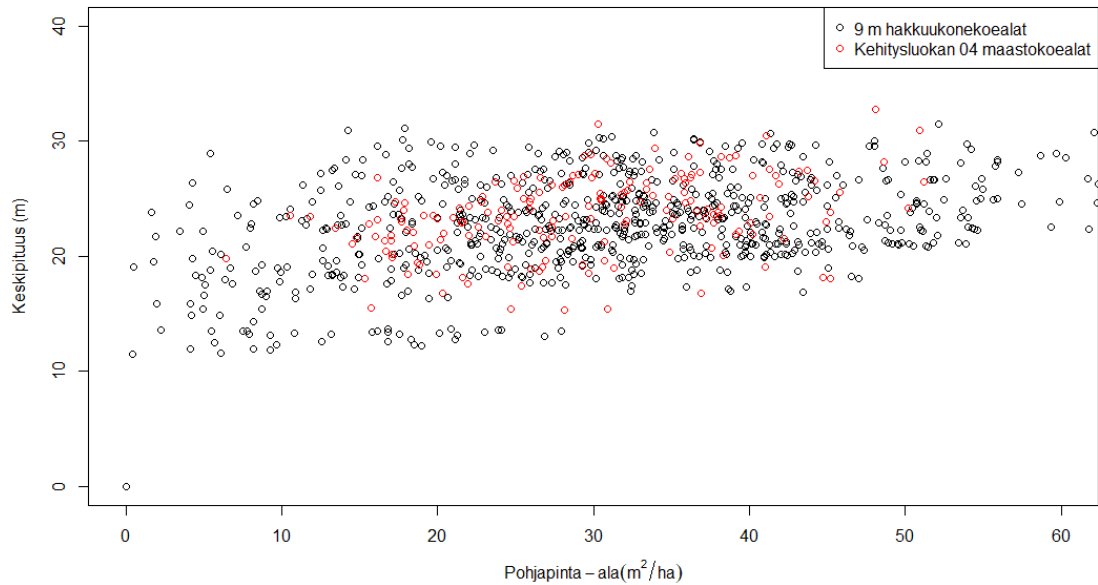
3.2 Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona

3.2.1 Opetusaineiston kattavuus

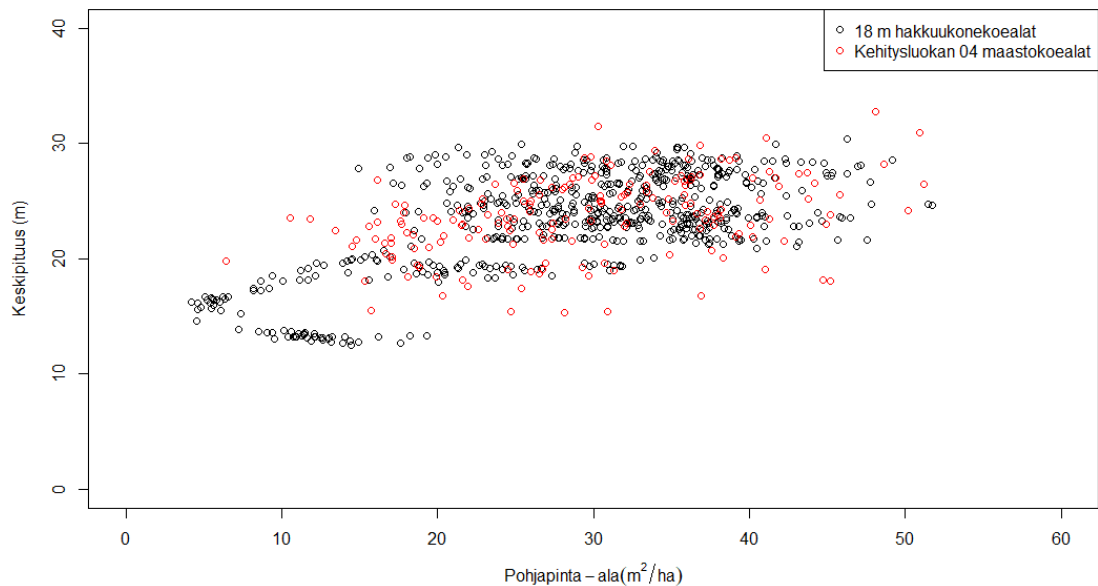
Kuvissa 3.7 – 3.10 on esitetty kahdeksalle opetusleimikolle muodostettujen koealojen keskipituudet pohjapinta-alojen funktiona. Koealojen puustotiedot on laskettu hakkuukonemittauksista ja puut on paikannettu hakkuukoneen sijaintiin (hakkuukonekoealat). Kuviin on lisätty maastokoealojen keskipituudet ja pohjapinta-alat, jotka kuvaavat koko tutkimusalueen metsien vaihtelua.

Kuvasta 3.7 havaitaan, että yhdeksän metrin hakkuukonekoealojen pohjapinta-alan ja pituuden hajonta kattaa maastokoealojen uudistuskypsissä metsissä sijaitsevien koealojen pohjapinta-alan ja pituuden vaihtelun. Kuvasta 3.9 havaitaan, että hakkuukonekoealat eivät kata maastokoealojen nuoressa kasvatusmetsässä ja varttuneessa kasvatusmetsässä sijaitsevien koealojen pohjapinta-alan ja pituuden vaihtelua. Kuvista 3.8 ja 3.10 havaitaan, että koealakoon suurentaminen 18 metriin supistaa hakkuukonekoealojen

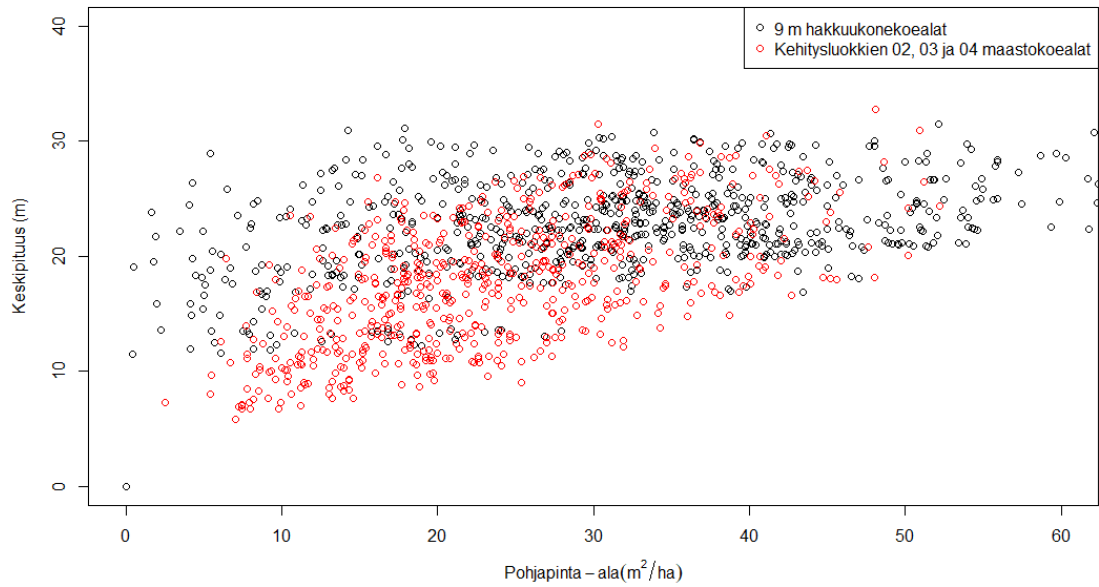
vaihtelua suhteessa maastokoealoihin. Opetus- ja testiaineistojen leimikkotason puustotunnusten keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit on esitetty taulukossa 2.5.



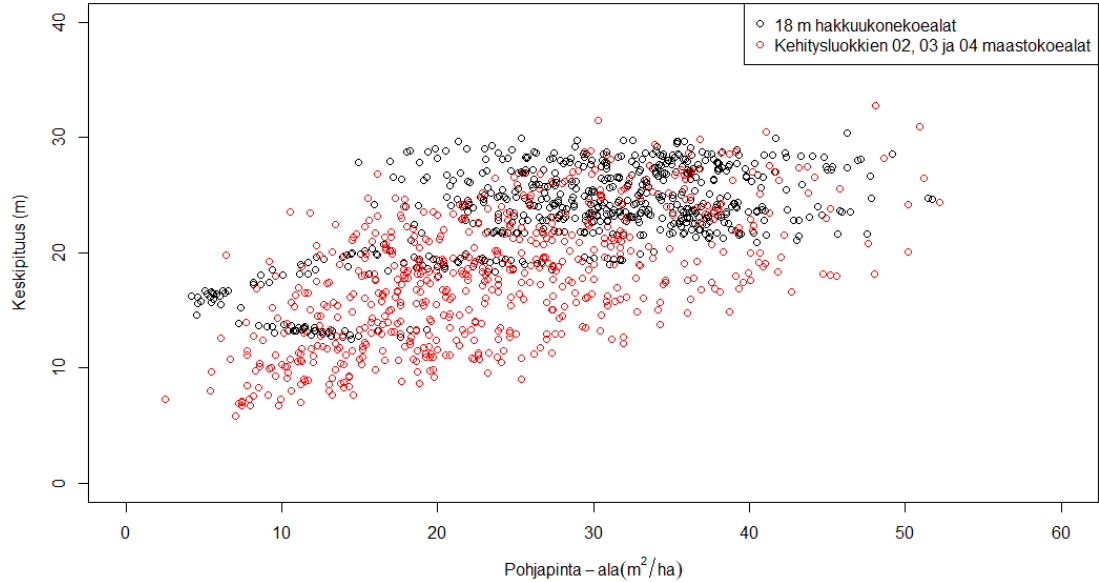
Kuva 3.7. Säteeltään 9 metrin hakkuukonekoealojen ja uudistuskypsien metsiköiden maastokoealojen keskipituus ja pohjapinta-ala.



Kuva 3.8. Säteeltään 18 metrin hakkuukonekoealojen ja uudistuskypsien metsiköiden maastokoealojen keskipituus ja pohjapinta-ala.



Kuva 3.9. Säteeltään 9 metrin hakkuukonekoealojen ja nuorten kasvatusmetsiköiden, varttuneiden kasvatusmetsiköiden sekä uudistuskypsien metsiköiden maastokoealojen keskipituus ja pohjapinta-ala.



Kuva 3.10. Säteeltään 18 metrin hakkuukonekoealojen ja nuorten kasvatusmetsiköiden, varttuneiden kasvatusmetsiköiden sekä uudistuskypsien metsiköiden maastokoealojen keskipituus ja pohjapinta-ala.

3.2.2 K:n lähimmän naapurin malleissa käytetyt selittäjät

Selittäjävalinnassa k-MSN-malleihin valikoituneet selittäjät on esitetty taulukoissa 3.3 ja 3.4. Piirretunnusten selitykset on esitetty liitteessä 2. Puuston pituutta, tiheyttä (pohjapinta-alaa) ja pituuden vaihtelua kuuvavat piirteet olivat laserkeilauspistepilven korkeutta ja korkeushajontaa kuvaavia piirteitä. Puulajeja erottamaan valikoituneet piirteet olivat ilmakuville värjätystä laserpistepilvestä tai normalisoidusta kasvillisuusindeksistä (NDVI) laskettuja tunnuksia.

Taulukko 3.3. K- MSN- malleihin valikoituneet selittäjät, kun opetusaineistona käytettiin hakkuukoneen sijaintiin paikannettuja puita. Selittäjiksi laserpistepilvestä lasketuista piirteistä valittiin vahviten puuston pituuden, pohjapinta-alan, pituuden hajonnan kanssa korreloivat piirteet, sekä ilmakehän tai ilmakehällä värjätyyn laserpistepilven piirteet, joilla puulajien välinen korrelaatioero oli suurin. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Koeala- yhdistelmät		Selittäjät					
Koealan säde (m)	maastokoealojen kehitysluokka	H	G	Hstd	Mänty -	Mänty -	Kuusi -
					Kuusi	Lehtipuu	Lehtipuu
9	-	L_L30M_09	L_L30M5_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
9	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
9	04	L_L30M_09	L_L30M5_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
12.73	-	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
12.73	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M_29	L_L30M_28	A_N32_MEAN	C_N1_P50	R_NMEAN
12.73	04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
15.59	-	L_L30M_09	L_L30M5_29	L_L30M_28	A_N32_P25	A_N12_MA X	R_NMEAN
15.59	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
15.59	04	L_X_ZP85	L_X_VD	L_L30M_28	A_N32_MEAN	C_N1_P50	R_NMEAN
18	-	L_L30M_09	L_L30M5_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P50	R_NMEAN
18	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
18	04	L_X_ZP85	L_L30M_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
Ei hakkuu- konealoja	02, 03, 04	L_L30M_07	L_L30M7_29	L_L30M_28	R_R12_10	A_N12_P75	A_N22_P25
Ei hakkuu- konealoja	04	L_L30M_09	L_L30M7_29	L_L30M_28	R_RMEAN	C_N1_P75	R_NMEAN

Taulukko 3.4. K- MSN- malleihin valikoituneet selittäjät, kun opetusaineistona käytettiin hakkuulaitteen sijaintiin paikannettuja puita.. Selittäjiksi laserpistepilvestä lasketuista piirteistä valittiin vahviten puuston pituuden, pohjapinta-alan, pituuden hajonnan kanssa korreloivat piirteet, sekä ilmakehän tai ilmakehällä värjätyyn laserpistepilven piirteet, joilla puulajien välinen korrelaatioero oli suurin. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Koeala- yhdistelmät		Selittäjät					
Koealan säde (m)	SMK-kehitys- luokat	H	G	Hstd	Mänty - Kuusi	Mänty - Lehtipuu	Kuusi - Lehtipuu
9	-	L_L30M_07	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
9	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
9	04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
12.73	-	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
12.73	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_MEAN	C_N1_P75	R_NMEAN
12.73	04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
15.59	-	L_L30M_07	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
15.59	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
15.59	04	L_X_ZP85	L_L30M5_29	L_L30M_28	C_N3_MEAN	C_N1_P75	R_NMEAN
18	-	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
18	02, 03, 04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P25	C_N1_P75	R_NMEAN
18	04	L_X_ZP85	L_L30M7_29	L_L30M_28	A_N32_P50	C_N1_P75	R_NMEAN
<i>Ei hakkuu- konealoja</i>	02, 03, 04	L_L30M_07	L_L30M7_29	L_L30M_28	R_R12_10	A_N12_P75	A_N22_P25
<i>Ei hakkuu- konealoja</i>	04	L_L30M_09	L_L30M7_29	L_L30M_28	R_RMEAN	C_N1_P75	R_NMEAN

3.2.3 Leimikkotason ennusteiden tarkkuus

Rajatulla testiaineistolla puiden paikannus hakkuulaitteen sijaintiin keskimäärin pienensi leimikkokohtaisten summaamalla laskettujen tunnusten (pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus ja tukkitilavuus) ennusteiden RMSE-arvoja 9 ja 12,73 metrin koealakoolla, kun RMSE-arvoja verrattiin hakkuukoneen sijaintia käyttämällä laskettuihin arvoihin. Runkoluvun ennusteen RMSE pieneni myös 15,59 metrin koealakoolla. Hakkuukoneen

sijainnin käyttäminen puun sijaintina tuotti summatunnuksilla pienemmän RMSE:n 15,59 metrin ja 18 metrin koealakoilla, runkolukua lukuun ottamatta. Leimikkokohtaisilla keskiarvoistamalla lasketuilla tunnuksilla (keskipituus ja keskiläpimitta) puiden paikannus hakkuulaitteen sijaintiin ei pienentänyt RMSE:tä, lukuunottamatta keskiläpimittaa 12,73 metrin hakkuukonekoealakoolla. Puustotunnuksilla ja koealakoilla, joilla hakkuulaitteen paikannus paransi ennusteen tarkkuutta, RMSE aleni puustotunnuksesta ja koealakoosta riippuen 0,1 (keskiläpimitta 12,73 metrin koealakoolla) – 18,1 %-yksikköä (runkoluku 9 metrin koealakoolla). (Taulukko 3.5, kuva 3.12)

Rajatulla testiaineistolla käytettäessä opetuskoeloina hakkuukonekoealoja saavutettiin 15,59 metrin hakkuukonekoealakoolla ja hakkuukoneen sijaintia puiden sijaintina käyttäen pienimmät RMSE:t keskiläpimitalle, pohjapinta-alalle ja tilavuudelle. Keskipituudelle ja runkoluvulle tarkimmat hakkuukonekoealoja käyttämällä tehdyt ennusteet saatiin yhdeksän ja 18 metrin koealakoilla ja hakkuukoneen sijaintia käyttämällä. Tukkitilavuus oli ainut puustotunnus, jolle tarkin hakkuukonekoealaennuste saatiin hakkuulaitteen sijaintia käyttämällä (9 metrin koealako). (Taulukko 3.5, kuva 3.12)

Rajatulla testiaineistolla verrattaessa hakkuukonekoealojen käyttöä maastokoealojen käyttöön saavutettiin ainoastaan keskiläpimitalla tarkin ennuste hakkuukonekoealoja käyttämällä. Pohjapinta-alan, keskipituuden, runkoluvun ja tilavuuden tarkin ennuste saavutettiin uudistuskypsistä metsiköistä (KL 04) kerättyjä koealoja käyttämällä. Tukkitilavuuden tarkin ennuste saavutettiin nuorista kasvatusmetsiköistä (KL 02), varttuneista kasvatusmetsiköistä (KL 03) ja uudistuskypsistä metsiköistä (KL 04) kerättyjä maastokoealoja käyttämällä. (Taulukko 3.5, kuva 3.12)

Koko testiaineistoa käytettäessä maastokoealat tuottivat runkolukua lukuun ottamatta kaikilla puustotunnuksilla tarkimmat ennusteet. Verrattaessa koko testiaineistolla puiden paikantamista hakkuulaitteen tai hakkuukoneen sijaintiin tarkentui ennuste keskipituutta lukuunottamatta kaikkien puustotunnusten 9 ja 12,73 metrin koealakoilla. Keskipituuden ennuste tarkentui ainoastaan 12,73 metrin koealakoolla, mutta 9 metrin koealakoolla RMSE oli sama hakkuulaitteelle ja hakkuukoneelle. Runkoluvulla puiden paikantaminen hakkuulaitteen sijaintiin tarkensi ennustetta myös 15,59 metrin koealakoolla. Koealakoilla ja puustotunnuksilla, joilla puiden paikannus hakkuulaitteen sijaintiin

tarkensi ennusteita, RMSE pieneni 0,4 (keskipituus 12,73 metrin koalakoolla) – 16,7 %-yksikköä (runkoluku 9 metrin koalakoolla). (Taulukko 3.5, kuva 3.13)

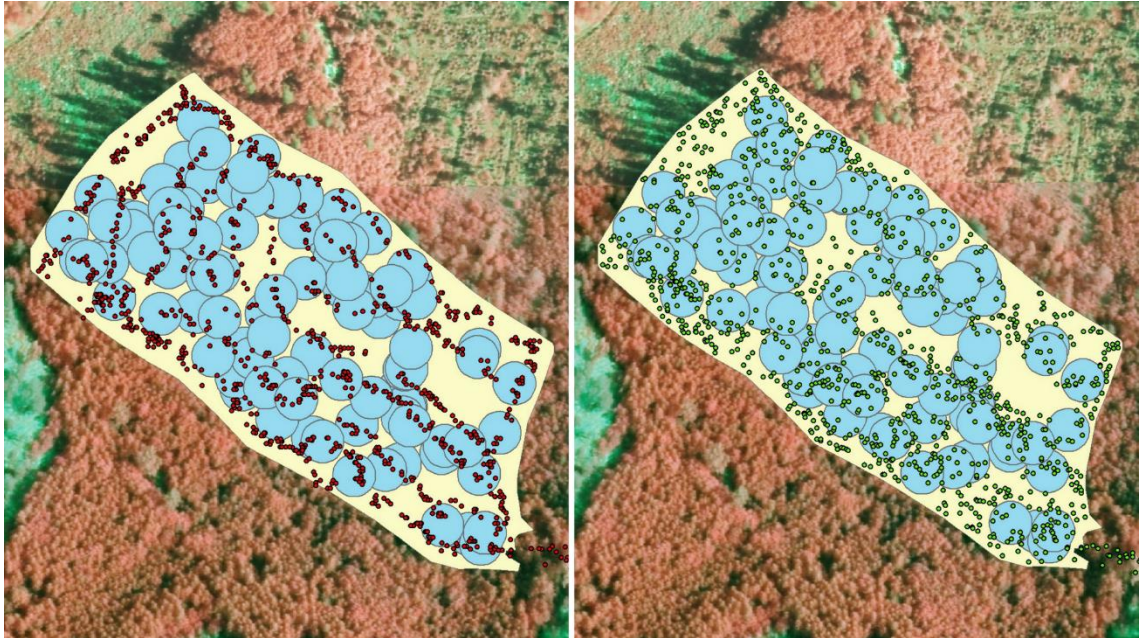
Koko testiaineistoa ja pelkkiä hakkuukonekoealoja käytettäessä tarkimpia ennusteita tuottanut koalakoko ja paikannusmenetelmä olivat pituudella, läpimitalla, tilavuudella ja tukkitilavuudella 9 metriä ja hakkuulaitteen sijaintiin paikantaminen. Pohjapinta-alalla hakkuukonekoealoista tarkimman ennusteen tuotti 12,73 metrin koalakoko ja hakkuulaitteen käyttäminen puiden sijaintina. Runkoluvulla hakkuukonekoealoista tarkimman ennusteen tuotti 18 metrin koalakoko ja hakkuukoneen sijainnin käyttäminen puiden sijaintina. (Taulukko 3.5, kuva 3.13)

Hakkuukonekoealojen käyttö maastokoealojen lisäaineistona tarkensi ennusteita kaikilla puustotunnuksilla, kun tarkkuutta verrattiin pelkkien maastokoealojen tai pelkkien hakkuukonekoealojen avulla tehtyihin ennusteisiin. Vertailussa käytettiin rajattua testiaineistoa ja puiden paikannusta hakkuulaitteen sijaintiin. Läpimitan, pohjapinta-alan, keskipituuden, tilavuuden ja tukkitilavuuden tarkin ennuste saatiin käyttämällä 9 tai 12,73 metrin hakkuukonekoalakokoa sekä kehitysluokkien 02, 03 ja 04 maastokoealoja. Runkoluvun tarkin ennuste saatiin 15,59 metrin koalakoolla ja kehitysluokan 04 maastokoealoilla. Tarkimman lisäaineiston avulla tehdyn ennusteen ja pelkkien maastokoealojen avulla tehdyn tarkimman ennusteen RMSE-ero vaihteli puustotunnuksesta riippuen 0,3 -3,5 %-yksikön välillä. (Taulukko 3.6, kuva 3.14)

Rajatulla testiaineistolla pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteet olivat kahta poikkeusta (tilavuus ja tukkitilavuus kehitysluokkien 02, 03 ja 04 maastokoealoilla) lukuun ottamatta yliarvioita. Keskipituuden ennusteissa harha oli alle metrin kaikilla aineistoilla ja keskiläpimitan ennusteissa harha oli alle 1,3 senttimetriä kaikilla aineistoilla. Maastokoealat tuottivat pienemmän harhan kuin hakkuukonekoealat. Hakkuukonekoealoilla puiden paikantaminen hakkuulaitteen sijaintiin pienensi summatunnusten (pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus, tukkitilavuus) yliarvioita pienillä koalakoilla. Paikannusmenetelmän vaikutus ennusteiden yliarvion suuruuteen pieneni, kun koalakokoa suurennettiin. 9 ja 12,73 metrin koalakoilla puiden paikannus hakkuulaitteen sijaintiin pienensi summatunnusten yliennusteita 6,1-19,4 %-yksikköä. (Taulukko 3.7, kuva 3.15)

Paikannustavan ja koalakoon vaikutus kokonaistunnusten RMSE:n on esitetty taulukossa 3.5 ja kuvissa 3.12 ja 3.13. Hakkuukoneella kerätyn puutiedon vaikutus

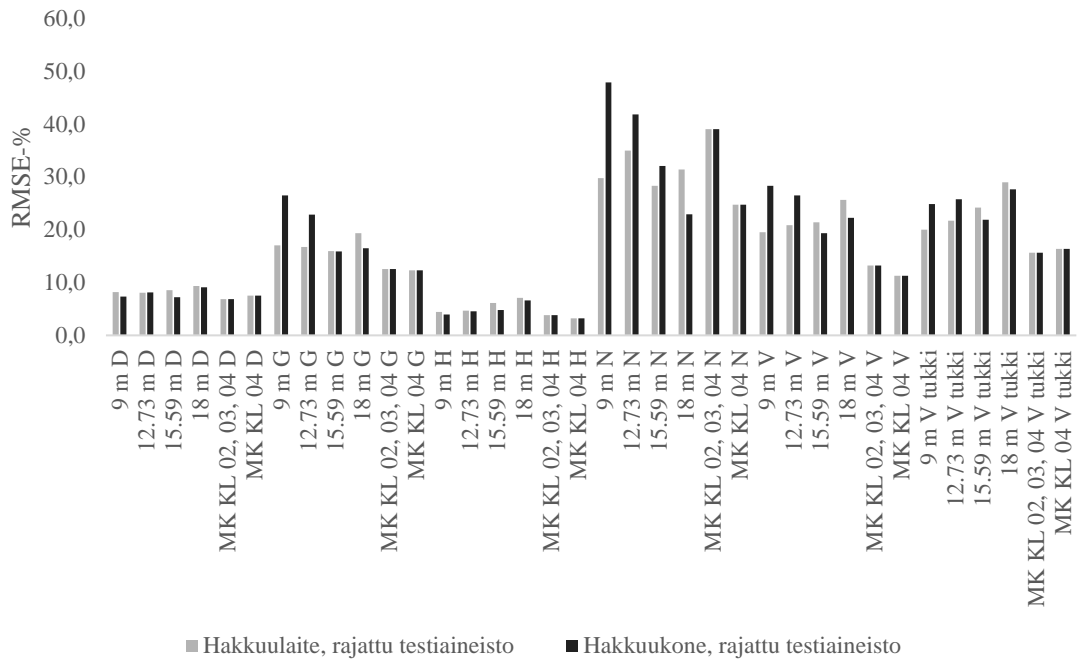
puustotunnusten ennustustarkkuuteen on esitetty taulukossa 3.6 ja kuvassa 3.14. Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutus leimikkotason harhaan on esitetty taulukossa 3.7 ja kuvassa 3.15. Esimerkki hakkuulaitteen paikannuksen vaikutuksesta puiden sijoittumiseen koaloille on esitetty kuvassa 3.11.



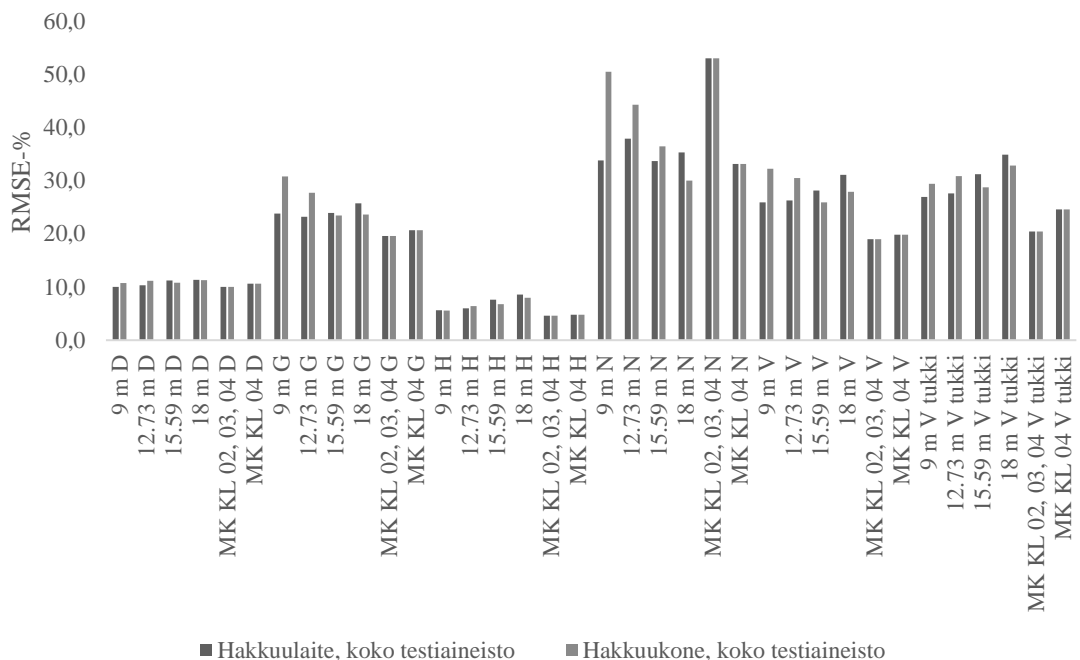
Kuva 3.11. Esimerkki hakkuukoneen (vasen) ja paikannetun hakkuulaitteen (oikea) sijaintiin paikannettujen puiden sijainnista leimikolla ja sijoittumisesta muodostetuille yhdeksän metrin koaloille.

Taulukko 3.5. Leimikkotason kokonaistunnusten absoluuttinen ja suhteellinen RMSE eri paikannusmenetelmillä ja testiaineistoilla käyttäen opetuskoealoina erikokoisia hakkuukonekoealoja ja eri kehitysluokkien maastokoealoja (MK). Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

RMSE (RMSE- %)	Koko testiaineisto			Rajattu testiaineisto		
	Hakkuukone	Hakkuulaite	Hakkuukone - hakkuulaite	Hakkuukone	Hakkuulaite	Hakkuukone - hakkuulaite
<i>9 m D (cm)</i>	3.1 (10.8)	2.9 (10.0)	0.2 (0.8)	2.1 (7.3)	2.3 (8.2)	-0.2 (-0.9)
<i>12.73 m D</i>	3.2 (11.2)	2.9 (10.3)	0.3 (0.9)	2.3 (8.2)	2.3 (8.1)	0.0 (0.1)
<i>15.59 m D</i>	3.1 (10.8)	3.2 (11.2)	-0.1 (-0.4)	2.0 (7.2)	2.4 (8.6)	-0.4 (-1.4)
<i>18 m D</i>	3.2 (11.3)	3.2 (11.4)	0.0 (-0.1)	2.6 (9.1)	2.6 (9.4)	0.0 (-0.3)
<i>MK KL 02, 03, 04 D</i>	2.9 (10.0)	2.9 (10.0)	0.0 (0.0)	1.9 (6.9)	1.9 (6.9)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 D</i>	3.0 (10.6)	3.0 (10.6)	0.0 (0.0)	2.1 (7.5)	2.1 (7.5)	0.0 (0.0)
<i>9 m G (m² ha⁻¹)</i>	7.5 (30.8)	5.8 (23.8)	1.7 (7.0)	6.4 (26.5)	4.1 (17.1)	2.3 (9.4)
<i>12.73 m G</i>	6.8 (27.7)	5.7 (23.2)	1.1 (4.5)	5.5 (22.9)	4.1 (16.7)	1.4 (6.2)
<i>15.59 m G</i>	5.7 (23.5)	5.8 (23.9)	-0.1 (-0.4)	3.9 (15.9)	3.9 (16.0)	0.0 (-0.1)
<i>18 m G</i>	5.8 (23.6)	6.3 (25.8)	-0.5 (-2.2)	4.0 (16.5)	4.7 (19.3)	-0.7 (-2.8)
<i>MK KL 02, 03, 04 G</i>	4.8 (19.6)	4.8 (19.6)	0.0 (0.0)	3.0 (12.5)	3.0 (12.5)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 G</i>	5.1 (20.7)	5.1 (20.7)	0.0 (0.0)	3.0 (12.3)	3.0 (12.3)	0.0 (0.0)
<i>9 m H (m)</i>	1.3 (5.6)	1.3 (5.6)	0.0 (0.0)	0.9 (4.0)	1.0 (4.4)	-0.1 (-0.4)
<i>12.73 m H</i>	1.5 (6.4)	1.4 (6.0)	0.1 (0.4)	1.0 (4.6)	1.1 (4.7)	-0.1 (-0.1)
<i>15.59 m H</i>	1.5 (6.8)	1.7 (7.6)	-0.2 (-0.8)	1.1 (4.8)	1.4 (6.1)	-0.3 (-1.3)
<i>18 m H</i>	1.8 (8.0)	1.9 (8.6)	-0.1 (-0.6)	1.5 (6.6)	1.6 (7.1)	-0.1 (-0.5)
<i>MK KL 02, 03, 04 H</i>	1.0 (4.6)	1.0 (4.6)	0.0 (0.0)	0.9 (3.8)	0.9 (3.8)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 H</i>	1.1 (4.8)	1.1 (4.8)	0.0 (0.0)	0.7 (3.2)	0.7 (3.2)	0.0 (0.0)
<i>9 m N (kpl ha⁻¹)</i>	293.2 (50.5)	196.1 (33.8)	97.1 (16.7)	272.7 (47.9)	169.4 (29.7)	103.3 (18.2)
<i>12.73 m N</i>	257.2 (44.3)	219.9 (37.9)	37.3 (6.4)	238.3 (41.8)	199.1 (35.0)	39.2 (6.8)
<i>15.59 m N</i>	211.5 (36.4)	195.7 (33.7)	15.8 (2.7)	182.6 (32.1)	161.3 (28.3)	21.3 (3.8)
<i>18 m N</i>	174.2 (30.0)	205.0 (35.3)	-30.8 (-5.3)	130.5 (22.9)	178.7 (31.4)	-48.2 (-8.5)
<i>MK KL 02, 03, 04 N</i>	307.7 (53.0)	307.7 (53.0)	0.0 (0.0)	222.2 (39.0)	222.2 (39.0)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 N</i>	192.4 (33.1)	192.4 (33.1)	0.0 (0.0)	140.9 (24.7)	140.9 (24.7)	0.0 (0.0)
<i>9 m V (m³ha⁻¹)</i>	87.0 (32.2)	70.0 (25.9)	17.0 (6.3)	75.6 (28.3)	52.2 (19.5)	23.4 (8.8)
<i>12.73 m V</i>	82.3 (30.5)	70.9 (26.3)	11.4 (4.2)	70.7 (26.5)	55.7 (20.9)	15.0 (5.6)
<i>15.59 m V</i>	69.9 (25.9)	76.0 (28.2)	-6.1 (-2.3)	51.7 (19.4)	57.1 (21.4)	-5.4 (-2.0)
<i>18 m V</i>	75.4 (27.9)	83.9 (31.1)	-8.5 (-3.2)	59.4 (22.3)	68.4 (25.6)	-9.0 (-3.3)
<i>MK KL 02, 03, 04 V</i>	51.3 (19.0)	51.3 (19.0)	0.0 (0.0)	35.3 (13.2)	35.3 (13.2)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 V</i>	53.7 (19.9)	53.7 (19.9)	0.0 (0.0)	30.1 (11.3)	30.1 (11.3)	0.0 (0.0)
<i>9 m V tukki m³/ha</i>	59.4 (29.4)	54.4 (26.9)	5.0 (2.5)	49.5 (24.9)	39.8 (20.0)	9.7 (4.9)
<i>12.73 m V tukki</i>	62.2 (30.8)	55.7 (27.6)	6.5 (3.2)	51.2 (25.8)	43.1 (21.7)	8.1 (4.1)
<i>15.59 m V tukki</i>	58.0 (28.8)	63.0 (31.2)	-5.0 (-2.4)	43.6 (21.9)	48.1 (24.2)	-4.5 (-2.3)
<i>18 m V tukki</i>	66.3 (32.8)	70.3 (34.9)	-4.0 (-2.1)	55.0 (27.7)	57.7 (29.0)	-2.7 (-1.3)
<i>MK KL 02, 03, 04 V tukki</i>	41.2 (20.4)	41.2 (20.4)	0.0 (0.0)	31.1 (15.7)	31.1 (15.7)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 V tukki</i>	49.6 (24.6)	49.6 (24.6)	0.0 (0.0)	32.6 (16.4)	32.6 (16.4)	0.0 (0.0)



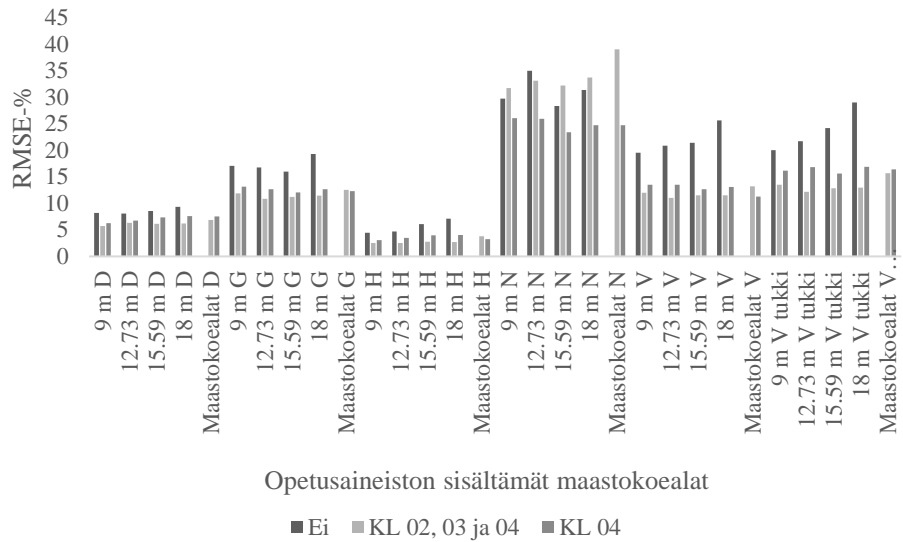
Kuva 3.12. Leimikkotason ennustetut puustotunnukset eri hakuukonekoealakoilla, maastokoealojen (MK) eri kehitysluokilla ja eri paikannusmenetelmillä käyttäen rajattua testiaineistoa. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.



Kuva 3.13. Leimikkotason ennustetut puustotunnukset eri hakuukonekoealakoilla, maastokoealojen (MK) eri kehitysluokilla ja eri paikannusmenetelmillä käyttäen koko testiaineistoa. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Taulukko 3.6. Leimikkokohtaisten ennustettujen puustotunnusten suhteellinen RMSE, kun aineistona käytettiin rajattua testiaineistoa, hakkuulaitteella paikannettua opetusaineistoa sekä maastokoealoja. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

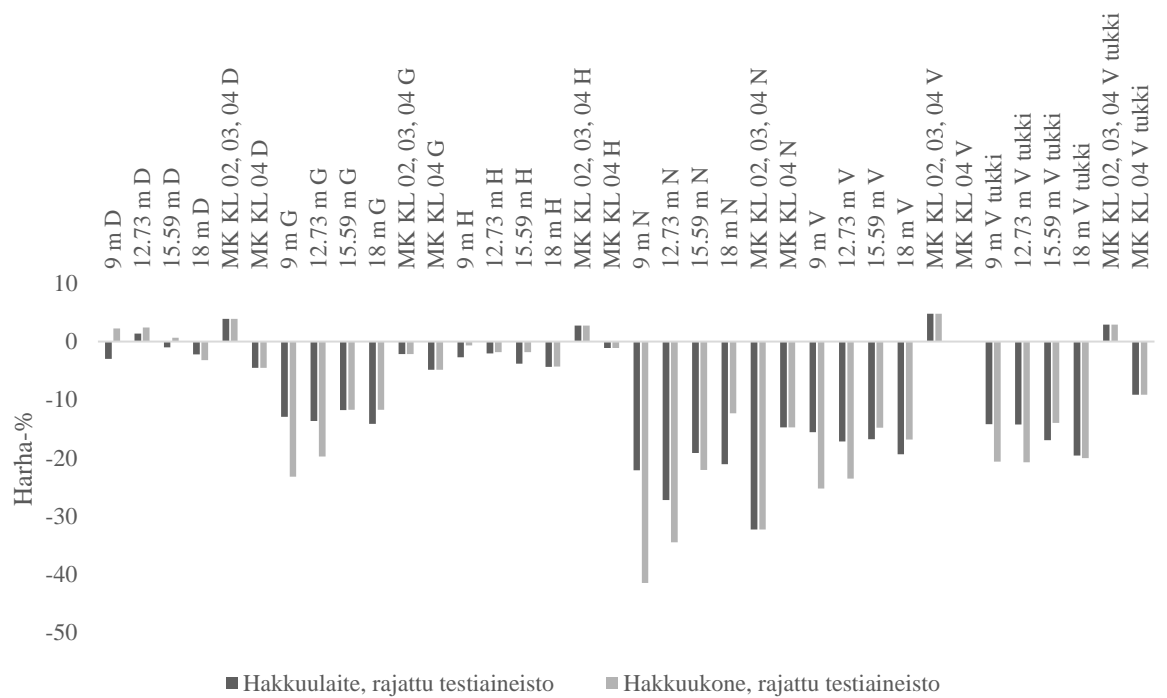
RMSE-%		Maastokoealat	
Koealasarja	Ilman maastokoealoja	KL 02,03 ja 04	KL 04
<i>9 m D</i>	8.2	5.7	6.3
<i>12.73 m D</i>	8.1	6.3	6.7
<i>15.59 m D</i>	8.6	6.1	7.3
<i>18 m D</i>	9.4	6.2	7.6
<i>Maastokoealat D</i>		6.9	7.5
<i>9 m G</i>	17.1	11.9	13.1
<i>12.73 m G</i>	16.7	10.9	12.7
<i>15.59 m G</i>	16.0	11.2	12.0
<i>18 m G</i>	19.3	11.4	12.7
<i>Maastokoealat G</i>		12.5	12.3
<i>9 m H</i>	4.4	2.5	3.1
<i>12.73 m H</i>	4.7	2.6	3.5
<i>15.59 m H</i>	6.1	2.8	4.0
<i>18 m H</i>	7.1	2.7	4.1
<i>Maastokoealat H</i>		3.8	3.2
<i>9 m N</i>	29.7	31.7	26.0
<i>12.73 m N</i>	35.0	33.1	25.9
<i>15.59 m N</i>	28.3	32.2	23.4
<i>18 m N</i>	31.4	33.7	24.7
<i>Maastokoealat N</i>		39.0	24.7
<i>9 m V</i>	19.5	12.0	13.5
<i>12.73 m V</i>	20.9	11.0	13.5
<i>15.59 m V</i>	21.4	11.5	12.6
<i>18 m V</i>	25.6	11.5	13.1
<i>Maastokoealat V</i>		13.2	11.3
<i>9 m V tukki</i>	20.0	13.5	16.1
<i>12.73 m V tukki</i>	21.7	12.2	16.8
<i>15.59 m V tukki</i>	24.2	12.8	15.6
<i>18 m V tukki</i>	29.0	13.0	16.9
<i>Maastokoealat V tukki</i>		15.7	16.4



Kuva 3.14. Leimikkokohtaisten ennustettujen puustotunnusten suhteellinen RMSE, kun hakkuukonekoealojen ja maastokoealojen hyödyntämistä yhdessä testattiin rajatulla testiaineistolla. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Taulukko 3.7. Leimikkokohtaisten kokonaistunnusten absoluuttinen ja suhteellinen harha eri hakkuukonekoealakoilla, paikannusmenetelmillä, testiaineistoilla ja maastokoealojen (MK) eri kehitysluokilla. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

Harha (harha-%)	Koko testiaineisto			Rajattu testiaineisto		
	Hakkuukone	Hakkuulaite	Hakkuukone - hakkuulaite	Hakkuukone	Hakkuulaite	Hakkuukone - hakkuulaite
<i>9 m D</i>	0.8 (2.8)	-0.5 (-1.9)	1.3 (4.7)	0.6 (2.3)	-0.8 (-3.0)	1.4 (5.3)
<i>12.73 m D</i>	0.9 (3.0)	0.6 (2.2)	0.3 (0.8)	0.7 (2.4)	0.4 (1.4)	0.3 (1.0)
<i>15.59 m D</i>	0.3 (1.2)	0.0 (-0.1)	0.3 (1.3)	0.2 (0.6)	-0.3 (-1.0)	0.5 (1.6)
<i>18 m D</i>	-0.6 (-2.1)	-0.4 (-1.5)	-0.2 (-0.6)	-0.9 (-3.2)	-0.6 (-2.2)	-0.3 (-1.0)
<i>MK KL 02, 03, 04 D</i>	1.3 (4.7)	1.3 (4.7)	0.0 (0.0)	1.1 (3.9)	1.1 (3.9)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 D</i>	-1.1 (-3.9)	-1.1 (-3.9)	0.0 (0.0)	-1.3 (-4.5)	-1.3 (-4.5)	0.0 (0.0)
<i>9 m G</i>	-5.5 (-22.5)	-2.9 (-11.8)	-2.6 (-10.7)	-5.6 (-23.2)	-3.1 (-12.9)	-2.5 (-10.3)
<i>12.73 m G</i>	-4.3 (-17.8)	-3.1 (-12.7)	-1.2 (-5.1)	-4.8 (-19.8)	-3.3 (-13.7)	-1.5 (-6.1)
<i>15.59 m G</i>	-2.6 (-10.7)	-2.7 (-11.1)	0.1 (0.4)	-2.8 (-11.7)	-2.9 (-11.8)	0.1 (0.1)
<i>18 m G</i>	-2.6 (-10.5)	-3.3 (-13.5)	0.7 (3.0)	-2.8 (-11.7)	-3.4 (-14.1)	0.6 (2.4)
<i>MK KL 02, 03, 04 G</i>	-1.1 (-4.7)	-1.1 (-4.7)	0.0 (0.0)	-0.5 (-2.1)	-0.5 (-2.1)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 G</i>	-1.6 (-6.6)	-1.6 (-6.6)	0.0 (0.0)	-1.2 (-4.8)	-1.2 (-4.8)	0.0 (0.0)
<i>9 m H</i>	-0.1 (-0.6)	-0.6 (-2.5)	0.5 (1.9)	-0.2 (-0.7)	-0.6 (-2.7)	0.4 (2.0)
<i>12.73 m H</i>	-0.4 (-1.6)	-0.4 (-1.7)	0.0 (0.1)	-0.4 (-1.8)	-0.5 (-2.0)	0.1 (0.2)
<i>15.59 m H</i>	-0.4 (-1.7)	-0.8 (-3.6)	0.4 (1.9)	-0.4 (-1.8)	-0.9 (-3.8)	0.5 (2.0)
<i>18 m H</i>	-0.9 (-3.9)	-1.0 (-4.2)	0.1 (0.3)	-1.0 (-4.3)	-1.0 (-4.3)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 02, 03, 04 H</i>	0.6 (2.6)	0.6 (2.6)	0.0 (0.0)	0.6 (2.7)	0.6 (2.7)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 H</i>	-0.3 (-1.1)	-0.3 (-1.1)	0.0 (0.0)	-0.3 (-1.1)	-0.3 (-1.1)	0.0 (0.0)
<i>9 m N</i>	-231.4 (-39.8)	-109.7 (-18.9)	-121.7 (-20.9)	-236.5 (-41.5)	-126.1 (-22.1)	-110.4 (-19.4)
<i>12.73 m N</i>	-182.7 (-31.5)	-144.2 (-24.8)	-38.5 (-6.7)	-196.5 (-34.5)	-155.1 (-27.2)	-41.4 (-7.3)
<i>15.59 m N</i>	-112.5 (-19.4)	-101.6 (-17.5)	-10.9 (-1.9)	-125.7 (-22.1)	-109.3 (-19.2)	-16.4 (-2.9)
<i>18 m N</i>	-62.2 (-10.7)	-107.2 (-18.5)	45.0 (7.8)	-70.2 (-12.3)	-120.0 (-21.1)	49.8 (8.8)
<i>MK KL 02, 03, 04 N</i>	-212.0 (-36.5)	-212.0 (-36.5)	0.0 (0.0)	-184.0 (-32.3)	-184.0 (-32.3)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 N</i>	-98.3 (-16.9)	-98.3 (-16.9)	0.0 (0.0)	-84.1 (-14.8)	-84.1 (-14.8)	0.0 (0.0)
<i>9 m V</i>	-65.6 (-24.3)	-39.1 (-14.5)	-26.5 (-9.8)	-67.5 (-25.3)	-41.5 (-15.6)	-26.0 (-9.7)
<i>12.73 m V</i>	-56.5 (-20.9)	-42.4 (-15.7)	-14.1 (-5.2)	-62.9 (-23.5)	-45.9 (-17.2)	-17.0 (-6.3)
<i>15.59 m V</i>	-36.1 (-13.4)	-42.4 (-15.7)	6.3 (2.3)	-39.6 (-14.8)	-44.8 (-16.8)	5.2 (2.0)
<i>18 m V</i>	-40.5 (-15.0)	-49.5 (-18.3)	9.0 (3.3)	-45.0 (-16.9)	-51.8 (-19.4)	6.8 (2.5)
<i>MK KL 02, 03, 04 V</i>	6.3 (2.3)	6.3 (2.3)	0.0 (0.0)	12.8 (4.8)	12.8 (4.8)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 V</i>	-4.2 (-1.6)	-4.2 (-1.6)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)
<i>9 m V tukki</i>	-39.1 (-19.4)	-26.6 (-13.2)	-12.5 (-6.2)	-41.1 (-20.6)	-28.3 (-14.2)	-12.8 (-6.4)
<i>12.73 m V tukki</i>	-36.0 (-17.8)	-25.3 (-12.5)	-10.7 (-5.3)	-41.3 (-20.8)	-28.3 (-14.2)	-13.0 (-6.6)
<i>15.59 m V tukki</i>	-24.8 (-12.3)	-31.4 (-15.6)	6.6 (3.3)	-27.8 (-14.0)	-33.7 (-16.9)	5.9 (2.9)
<i>18 m V tukki</i>	-35.3 (-17.5)	-37.2 (-18.5)	1.9 (1.0)	-39.8 (-20.0)	-39.0 (-19.6)	-0.8 (-0.4)
<i>MK KL 02, 03, 04 V tukki</i>	1.4 (0.7)	1.4 (0.7)	0.0 (0.0)	5.8 (2.9)	5.8 (2.9)	0.0 (0.0)
<i>MK KL 04 V tukki</i>	-21.2 (-10.5)	-21.2 (-10.5)	0.0 (0.0)	-18.2 (-9.2)	-18.2 (-9.2)	0.0 (0.0)



Kuva 3.15. Leimikkokohtaisten ennustettujen puustotunnusten suhteellinen harha eri hakkuukonekoealakoilla ja maastokoealojen eri kehitysluokilla, kun testiaineistona käytettiin rajattua testiaineistoa. Kehitysluokka 02 tarkoittaa nuorta kasvatusmetsikköä, 03 varttunutta kasvatusmetsikköä ja 04 uudistuskypsää metsikköä.

4. TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Hakkuulaitteen paikannuksen vaikutus yksittäisen puun sijainnin määrittämiseen ja puittaisista tiedoista laskettuun hakkuupoistumaan

Tulosten perusteella hakkuulaitteen paikannus vähentää paikannusvirhettä noin kolmanneksella. Hakkuulaitepaikannuksen avulla yksittäisen puun tasolla päästiin 4,93 metrin sijaintitarkkuuteen. Lindroos ym. (2015) arvioivat vaatimuksen yksittäisen puun sijaintitarkkuudelle olevan desimetreistä yhteen metriin, mikäli hakkuukonetietoa käytetään yksittäisten puiden yhdistämiseen laserkeilausaineistosta määritettyihin puiden sijainteihin. Laserkeilausaineistoon perustuvan aluepohjaisen puustotulkinnan vaatiman koealan sijaintitarkkuuden on arvioitu riippuvan ennustettavasta puustotunnuksesta. Keskipituuden ennustustarkkuuden on arvioitu heikentyvän vasta paikannusvirheen ylitettyä viisi metriä, kun taas pohjapinta-alan ja tilavuuden ennustustarkkuuden on arveltu olevan herkempi paikannusvirheelle (Gobakken ja Næset 2009). Yksittäisen puun paikannustarkkuus ei ole suoraan verrattavissa koealan paikannustarkkuuteen, koska koealan paikannusvirheen tilanteessa koko koeala siirtyy puihin nähden samaan suuntaan, kun taas puiden paikannusvirheen tilanteessa puut siirtyvät koealaan nähden todennäköisesti useampaan kuin yhteen suuntaan. Poistuman vertailu puiden todellisilla sijainneilla ja eri paikannusmenetelmillä kuvaa yksittäisten puiden siirtymän vaikutusta koealatasolla.

Kuvat 3.4 – 3.6 havainnollistavat hakkuulaitepaikannuksen tuomaa muutosta puiden paikantamiseen. Kuvassa 3.4 on esitetty puiden todelliset sijainnit. Kuvassa 3.5 on näkyvissä ainoastaan hakkuukoneen sijaintiin paikannetut puut, jolloin niiden sijoittumisesta koealalle voidaan havaita koneen eteneminen työpisteestä toiseen. Kuvassa 3.6 näkyvissä ovat hakkuulaitteen sijaintiin paikannetut puut, jotka hajoavat hakkuukoneen sijaintiin paikantamiseen verrattuna enemmän ympäri koealaa. Puiden jakautumista leimikolle tarkastellessa hakkuulaitepaikannus tuottaa realistisemman puukartan leimikosta.

Poistumaa tarkasteltaessa säteeltään yhdeksän metrin ympyräkoalan alueelta oli poistuman RMSE pienempi, kun puut paikannettiin hakkuulaitteen sijaintiin, eli hakkuulaitteen paikantaminen tekee koealatason puutiedosta keskimäärin

todennäköisempää. Poistuman kokonaismäärä koealoilta oli hakkuukoneen sijaintia käyttämällä lähempänä todellista poistumaa. Tämä johtui todennäköisesti koeasetelmasta. Esimerkki koealalta 1018 (kuvat 3.4 – 3.6) näyttää, että hakkuulaitteen siirtäessä paikannusta ajouralta pois päin, on kuusi todellisuudessa koealalla sijaitsevaa puuta siirtynyt kokonaan koealalta ulos. Hakkuukone paikantaa puut aina lähelle ajouraa, jolloin ajouran sijaitessa koealan keskellä ovat puut paikantuneet koealan sisälle. Yhdeksän metrin ympyräkoalojen sijaitessa käytännössä ajouran päällä, on koealan poistuma arvioitu melko tarkasti, vaikkei puiden paikannus vastaisikaan niiden todellista sijaintia. Jos koeala olisi isompi ja sisältäisi laajemman ajouraverkon, jolloin yhdeksän metrin koealoja osuisi myös ajourien väliin, olisi paikannusmenetelmien välillä todennäköisesti enemmän eroa poistumassa.

Hakkuulaitteen sijainnin määrittämisestä huolimatta paikannusmenetelmään sisältyy edelleen puiden latvusten aiheuttama GNSS-paikannuksen epätarkkuus. Hakkuukoneen ja hakkuulaitteen sijaintiin paikannettujen puiden sijaintitarkkuus oli huonoin kuusikoealoilla (n=2), jotka olivat puustoltaan järeämpiä kuin mäntykoealat. Vertailuaineiston sisältämien bussolin ja mittanauhan avulla paikannettujen puiden (n=72, 11% kaikista puista) paikannustarkkuus ei ollut tarkasti tiedossa. Kun vertailussa käytettiin pelkkiä maastolaserkeilauksen ja RTK-paikannuksen avulla paikannettuja puita, ei keskimääräinen euklidinen etäisyys kuitenkaan muuttunut merkittävästi, joten bussolin ja mittanauhan avulla paikannetut puut eivät oletettavasti vaikuttaneet saatujen tulosten luotettavuuteen.

Eri satelliittipaikannusjärjestelmiä, differentiaalikorjausta ja inertiamittausyksikköä hyödyntämällä hakkuukoneen paikannustarkkuudessa voidaan päästä alle metrin tarkkuuteen (Kaartinen ym. 2015). Hakkuukoneen paikannuksen kehittyessä hakkuukoneen puomin jatkeen merkitys virhelähteenä korostuu (Hauglin ym. 2017). Tutkimuksessa käytetty menetelmä hakkuulaitteen paikannukseen ei vaadi uusien laitteiden asennusta hakkuukoneisiin, joissa hakkuukoneen ohjaamo ja puomi liikkuvat yhdessä osoittaen samaan suuntaan.

4.2 Paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon käyttö laserkeilauksen aputietona

Rajatun testiaineiston tulosten (kuva 3.12) perusteella hakkuulaitteen paikannus ja koordinaattien jälkimuokkaus parantaa hakkuukoneella kerätyn puutiedon avulla tehdyn aluepohjaisen puustotulkinnan tarkkuutta, kun koealan säde on 9 tai 12,73 metriä (254 m² tai 509 m²) ja ennustetaan summatunnuksia (pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus, tukkitilavuus). Hakkuulaitteen paikannus myös pienensi summatunnusten ennusteiden harhaa pienillä koealakoilla. Erot hakkuulaitteen paikannuksen vaikutuksesta summa- ja keskiarvotunnusten ennusteisiin johtuvat puustotunnusten laskentatavasta. Keskipituus ja keskiläpimitta lasketaan koealalle osuneiden puiden pohjapinta-alalla painotettuna keskiarvona, jolloin läpimitta- tai pituusjakaumaltaan tasaisilla kuvioilla tunnuksot eivät ole herkkiä paikannusvirheelle. Pohjapinta-ala, runkoluku, tilavuus ja tukkitilavuus ovat summatunnuksia, jolloin koealalle osuneiden puiden puukohtaiset tunnuksot lasketaan koealatasolla yhteen ja suhteutetaan hehtaariohtaisiksi. Hakkuukoneen sijaintiin paikannettaessa osalla koealoista puiden määrä on todellista suurempi, mikä aiheuttaa yliarviota myös ennustettaviin summatunnuksiin. Hakkuulaitteen paikannus levittää paikannetut puut tasaisemmin leimikolle, jolloin summatunnusten ennuste paranee keskiarvotunnuksia enemmän.

Kuvan 3.12 perusteella koealan säteen kasvattaminen yli 12,73 metrin poistaa hakkuulaitteen paikannuksen ja hakkuukoneen paikannuksen välisen tarkkuuseron ennusteissa. Koealagoon kasvaessa paikannuksen sisältämän virheen vaikutus vähenee, kun puut, jotka pienellä koealakoolla paikantuisivat virheellisesti koealan ulkopuolelle, paikantuvat koealan sisään. Vastaavasti kasvava koealakoko lisää keskiarvoistumista, jolloin koealojen välinen vaihtelu puustotunnuksissa voi jäädä pienemmäksi. Hakkuukoneella kerätyn puutiedon käyttökelpoisuus aluepohjaisen inventointimenetelmän aputietona edellyttää, että hakkuukoneen mittaamat puut paikantuvat samalle opetuskoealalle, kuin puita vastaavat laser- ja ilmakuvapiirteet. Hakkuulaitteen paikannuksen tuoma parannus ennustustarkkuuteen johtuu yksittäisten puiden siirtymisestä lähemmäs tilannetta, jossa hakkuukoneaineiston puut sijaitsevat kaukokartoitustietoa vastaavalla koealalla. Kuva 3.11 havainnollistaa hakkuulaitepaikannuksen aiheuttamaa puiden levittäytymistä ajouralta tasaisemmin koealoille.

Keskipituuden ja läpimitan ennustustarkkuuteen hakkuulaitteen paikantaminen vaikutti muita tunnuksia vähemmän (kuvat 3.12 ja 3.13). Saman havainnon keskipituuden osalta

tekivät Gobakken ja Næsset (2009) tutkiessaan opetuskoealan paikannusvirheen vaikutusta laserkeilausperusteisessa puustotulkinnassa. Gobakken ja Næssetin (2009) tutkimuksessa koealagoon merkitys oli pohjapinta-alaa ja tilavuutta ennustaessa merkittävämpi kuin keskipituutta ennustettaessa. Rajatun testiaineiston tulosten perusteella summatunnuksilla koealagoon kasvattaminen 15,59 metriin parantaa hakkuukoneen sijaintia käyttämällä ennustettujen summatunnusten tarkkuutta, mutta 18 metriin kasvattaminen ei enää tarkenna ennusteita. Hakkuulaitteen sijaintia käyttämällä ennustettujen summatunnusten tarkkuus heikkenee koealagoon kasvaessa.

Summatunnuksille tarkimmat ennusteet hakkuukoneen mittaamia puita käyttämällä saatiin käyttämällä 15,59 tai 18 metrin koealasädettä ja paikantamalla puut hakkuukoneen sijaintiin, tai käyttämällä 9 metrin sädettä ja hakkuulaitteen sijaintia. Keskiarvotunnuksille tarkimmat ennusteet hakkuukonekoealoja käyttämällä tulivat 9 ja 15,59 metrin koealasäteillä ja hakkuukoneen sijaintia käyttämällä.

Harhan tarkastelun perusteella hakkuukoneaineisto aluepohjaisen puustotulkinnan apuaineistona tuottaa pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteissa yliarvioita (kuva 3.15). Harhan laskutavasta johtuen negatiivinen harha tarkoittaa ennusteen olevan keskimäärin mitattua suurempi. Hakkuulaitteen paikannus vähentää yliarvion suuruutta 9 ja 12,73 metrin koealakoolla, mutta ei poista harhaa kokonaan. Rajatulla testiaineistolla hakkuukonekoealat tuottivat harhaisempia pohjapinta-alan, runkoluvun ja tilavuuden ennusteita verrattaessa maastokoealoilla tuotettuihin ennusteisiin.

Yliarvioita estimoitavissa puustotunnuksissa voi puustotunnusten laskentatavan ja paikannusmenetelmän lisäksi aiheuttaa opetusaineiston keskimääräisesti järeämpi puusto. Taulukon 2.5 perusteella opetusaineiston kuusileimikot ovat keskimääräisiltä leimikon kokonaistunnuksiltaan lievästi suurempia kuin testiaineistot. Opetusaineiston pohjapinta-alan vaihteluvälin minimiarvoa tuo alaspäin yksittäinen mäntyleimikko, jolloin opetusaineiston pohjapinta-alalla ja keskipituudella rajattuun testiaineistoon päätyi mukaan pohjapinta-alaltaan pieniä kuusileimikoita, vaikkei vastaavia kuusileimikoita löydy opetusaineistosta. Vielä rajauksen jälkeenkin kuusileimikoiden vaihteluväli opetusaineistossa alkaa suuremmasta pohjapinta-alasta kuin testiaineistossa. Rajatussa testiaineistossa mäntyleimikoita ei ollut yhtäkään.

Rajattua testiaineistoa käytettäessä keskipituuden ja keskiläpimitan kaikilla eri koealakoilla päästiin Suomen metsäkeskuksen aluepohjaisen puustotulkinnan tavoitetarkkuuksiin (taulukko 1.1). Pohjapinta-alan ennusteista ainoastaan

maastokoealoilla tuotettu ennuste saavutti tavoitetarkkuuden. Tilavuuden ennusteista 9 ja 15,59 metrin koealakoilla saavutettiin tavoitetarkkuus. 9 metrin koealakoolla paikannusmenetelmänä oli hakkuulaitteen sijainti, 15,59 metrin koealakoolla hakkuukoneen sijainti.

Koko testiaineistoa käytettäessä keskipituuden ennuste kaikilla koealakoilla ja maastokoealoilla saavutti tavoitetarkkuuden. Keskiläpimitalla vain hakkuulaitteen sijaintia ja 9 tai 12,73 metrin koealakokoa käyttämällä saavutettiin tavoitetarkkuus. Pohjapinta-alan tavoitetarkkuuteen ei päästy millään ennusteella. Tilavuuden tavoitetarkkuuteen päästiin maastokoealoja käyttämällä. Puulajikohtaisten puustotunnusten ennustetarkkuuden vertailua ei tehty, koska opetusaineiston puulajijakauma oli kuusivaltainen (taulukko 2.5).

15,59 ja 18 metrin koealakokoa käytettäessä opetusaineistossa oli sata koealaa, eli yksi leimikko, vähemmän, mikä antoi vertailussa laajemman opetusaineiston yhdeksän ja 12,73 metrin koealakoolle. Leimikkokohtaisten tulosten tarkkuuteen heikentävästi vaikuttaa myös testiaineistossa olleet siemenpuuleimikot. Koko testiaineistossa siemenpuuleimikot olivat kuusi prosenttia testiaineiston pinta-alasta, rajatussa testiaineistossa kaksi prosenttia.

Vaikka Suomen metsäkeskuksen asettamat aluepohjaisen puustotulkinnan tarkkuusvaatimukset osittain saavutettiin, saatiin maastokoealojen avulla tarkempia ennusteita kuin hakkuukonekoealoilla (pois lukien runkoluku). Kun hakkuukoneella kerätyn puutiedon avulla ennustettujen puustotunnusten tarkkuutta verrataan maastokoealojen avulla ennustettuihin puustotunnuksiin, tulee huomioida opetusaineiston pieni määrä (8 leimikkoa) ja testiaineiston rajaaminen. Maastokoealat on kerätty edustamaan koko alueen puuston vaihtelua, kun taas tutkimuksessa käytetty hakkuukoneen ja hakkuulaitteen sijaintiin paikannettu puutieto oli operatiivisen käytön ehtoilla kerättyä, jolloin hakkuulaitteen sijaintiin paikannetun puutiedon määrä päätehakkuilta jäi vähäiseksi. Koko testiaineistolla puustotunnusten ennusteiden tarkkuuden voi odottaa parantuvan, jos opetusaineistoa kerättäisiin lisää vaihtelevammista metsistä. Kuvan 3.14 mukaan keskiläpimitan, pohjapinta-alan, keskipituuden, tilavuuden ja tukkitilavuuden RMSE pienenee, kun opetusaineistoon lisää nuorissa kasvatusmetsissä, varttuneissa kasvatusmetsissä ja uudistuskypsissä metsissä (kehitysluokat 02, 03 ja 04) sijaitsevat maastokoealat. Mikäli opetusaineistona käytetty

hakkuukoneaineisto sisältäisi riittävästi puiden koon vaihtelua, ei kehitysluokkien 02 ja 03 lisäämisen pitäisi parantaa ennustetta. Opetusaineiston keskiläpimitta ja keskipituus ovat suuremmat kuin testiaineistoissa (taulukko 2.5), mikä tukee havaintoa pienemmän puuston opetuskoealojen puutteesta. Taulukon 3.6 perusteella hakkuukonekoealojen käyttö maastokoealojen lisäaineistona tuotti jokaisella puustotunnuksella pienimmän RMSE:n, mutta kuvasta 3.14 nähdään tarkkuuden parannuksen olevan pelkkiin maastokoealoihin verrattuna vähäinen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn perusteella hakkuulaitteipaikannus parantaa yksittäisen puun sijaintitarkkuutta hakkuukoneaineistossa noin kolmanneksella. Tarkempi yksittäisen puun paikannus tarkentaa myös hakkuukoneaineiston ja kaukokartoitustiedon avulla ennustettua puuston pohjapinta-alaa, runkolukua, tilavuutta ja tukkitilavuutta koealakoon ollessa 250 - 500 neliometriä. Kun koealakoko oli 500-1000 neliometriä, hakkuukoneen keräämän puutiedon paikannusmenetelmä ei vaikuttanut aluepohjaisen puustotulkinnan tarkkuuteen. Hakkuulaitteen paikantamisella ja pienellä koealakoolla ei päästy tarkempiin ennusteisiin, kuin käyttämällä puiden paikannusmenetelmänä hakkuukoneen sijaintia ja koealakokona 500 – 1000 neliometriä. 256 neliömetrin koealakoolla puiden paikantaminen hakkuulaitteen sijaintiin tarkensi koealatasen pohjapinta-alan poistumaa verrattuna puiden paikantamiseen hakkuukoneen sijaintiin.

Hakkuulaitteella paikannetun puutiedon käyttö aluepohjaisen puustotulkintamenetelmän aputietona päätehakkuukypsissä metsissä on tutkimuksen tulosten perusteella ennustustarkkuuden osalta käyttökelpoinen vaihtoehto, mutta opetusaineiston pienen koon takia johtopäätökset tulee rajata ainoastaan paikannusmenetelmien vertailuun. Johtopäätökset hakkuulaitteella paikannetun puutiedon käytöstä aluepohjaisen menetelmän aputietona maastokoealojen sijaan vaatisivat suuremmalla opetusaineistolla tehdyn tutkimuksen. Hakkuukoneella kerätyn puutiedon käyttö maastokoealojen lisäaineistona ei tulosten perusteella tarkentanut puustotunnusten ennusteita verrattuna pelkillä maastokoealoilla tuotettuihin ennusteisiin.

Hakkuukoneella automaattisesti ja tarkasti mitattu puutieto on mahdollinen tietolähde aluepohjaisen puustotulkinnan lisäksi myös muille puunkorjuun suunnittelun sovelluksille. Esimerkiksi yksinpuintulkinnan ja hakkuukoneella mitatun puutiedon yhdistäminen vaatii, että yksittäinen puu hakkuukonetiedossa voidaan yhdistää kaukokartoitusaineistosta tunnistettuun yksittäiseen latvukseen. Jatkotutkimuskohteena tälle tutkimukselle voidaan testata yksittäisen puun sijainnin tarkentumisen vaikutusta muihin hakkuukoneella kerätyn puutiedon ja kaukokartoitustiedon yhteiskäyttösovelluksiin. Hakkuukoneiden paikannustarkkuuden kehittyessä tarvitaan hakkuukoneen puomin jatkovarren käytöstä entistä tarkempaa tallennettua tietoa.

Hakkuukoneen mittaaman puutiedon saatavuus on este hakkuukoneiden tiedonkeruun uusille käyttötavoille. Parantamalla hakkuukonetiedon saatavuutta sekä tallentamalla hakkuukoneen puomin suunta ja etäisyys kaikissa hakkuukoneissa, joissa se teknisesti on mahdollista, voidaan mahdollisesti tuottaa tarkempaa metsävaratietoa, vähentää tai poistaa kokonaan tarve maastokoealojen mittaamiselle päätehakkuumetsissä sekä luoda kattava yksinpuintulkinnan maastoaineisto. Tarkemman metsävaratiedon tulee tuottaa lisäarvoa puunkorjuuketjun eri toimijoille, jotta operatiivisen metsävaratiedon tarkkuuden kehityksen vaatimat investoinnit toteutuvat.

Kiitokset

Kiitän ohjaajaani tohtori Mikko Vastarantaa (HY) opetuksesta, opastuksesta ja ideoista tutkimuksen tekoon. Kiitän tohtori Jussi Peuhkurista (Arbonaut Oy) ja maatalousmetsätieteiden maisteri Sanna Sirparantaa (Arbonaut Oy) ohjeista ja avusta tutkielman teossa, sekä mahdollisuudesta työskennellä Arbonaut Oy:n tiloissa ja ArboLidar-ohjelmistolla. Kiitän Metsäteho Oy:tä aineistojen keruun järjestämisestä, hakkuukoneaineistojen käsittelystä sekä kuviorajauksista ja koordinaattien jälkimuokkauksesta. Tutkielmani oli osa kahta maa- ja metsätalousministeriön kärkihankerahoitusta saanutta hanketta. Hankkeet olivat ”Metsäkonetieto puustotulkinnan apuaineistona” ja ”Metsäkonetiedon välitys keskitettyyn tietokantaan ja tietokantasovelluspilotti”. Kiitän tutkielmani rahoituksesta maa- ja metsätalousministeriötä.

Lähdeluettelo

Arbonaut Oy. 2015. Metsätieto 2020 – Tavoitetila. [Verkkodokumentti] Saatavissa: <http://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Mets%C3%A4tieto+2020+Tavoitetila/d3e572a8-eb0b-4715-80ac-fe04dc45b2ca>. [Viitattu 21.9.2017]

Barth, A. & Holmgren, J. 2013. Stem taper estimates based on airborne laser scanning and cut-to-length harvester measurements for pre-harvest planning. *International Journal of Forest Engineering* 24 (3): 161-169.
<http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2013.858911>

Bollandsås, O. M, Maltamo, M., Gobakken, T., Lien, V. & Næsset, E. 2011. Prediction of Timber Quality Parameters of Forest Stands by Means of Small Footprint Airborne Laser Scanner Data. *International Journal of Forest Engineering* 22 (1): 14-23.

Braastad, H. 1980. Growth model computer program for *Pinus Sylvestris*. *Meddelelser fra Norsk Institutt for Skogforskning* 35 (5): 265-359.

Dalal, N. & Triggs, B. 2005. Histograms of oriented gradients for human detection. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.

Deza, M. M. & Deza, E. 2014. *Encyclopedia of Distances*. Third Edition. 583 s.

Elstrom, M. D., Smith, P. W. & Abidi, M. A. 1998. Stereo-based registration of ladar and color imagery. *Proceedings SPIE 3522. Intelligent Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Techniques, and Active Vision*. <http://dx.doi.org/10.1117/12.325781>

Frazer, G.W., Magnussen, S., Wulder M. A. & Niemann K. O. 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass. *Remote Sensing of Environment* 115 (2): 636-649. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.008>

Gobakken, T. & Næsset, E. 2004. Estimation of Diameter and Basal Area Distributions in Coniferous Forest by Means of Airborne Laser Scanner Data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (6): 529-542. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580410019454>

Gobakken, T. & Næsset, E. 2009. Assessing effects of positioning errors and sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data.

Canadian Journal of Forest Research 39 (5): 1036-1052. <https://doi.org/10.1139/X09-025>

Gobakken, T., Næsset, E., Nelson, R., Bollandsås, O. M., Gregoire, T. G., Ståhl, G., Holm, S., Ørka, H. O & Astrup, R. 2012. Estimating biomass in Hedmark County, Norway using national forest inventory field plots and airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 123: 443-456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.025>

Haralick, R. M, Shanmugam, K. & Dinstein, I. 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 3 (6): 610-621. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>

Hauglin, M., Hofstad-Hansen, E., Næsset, E., Busterud, B., Gjevestad, J. & Gobakken, T. 2017. Accurate single-tree positions from a harvester: a test of two global satellite-based positioning systems. *Scandinavian Journal of Forest Research*. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2017.1296967>

Holmgren, J. & Jonsson, T. 2004. Large scale airborne laser scanning of forest resources in Sweden. *Proceedings of the ISPRS working group. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (8/W2): 157-160.*

Holmgren, J., Barth, A., Larsson H. & Olsson, H. 2012. Prediction of Stem Attributes by Combining Airborne Laser Scanning and Measurements from Harvester. *Silva Fennica* 46 (2): 227-239.

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu* 7: 1-152.

Hudak, A., Crookston, N. L., Evans, J. S., Hall, D. E. & Falkowski, M. J. 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 112 (5): 2232-2245. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.009>

Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogrammetric Journal of Finland* 16 (2): 27-42.

- Jakubowski, M. K., Guo, Q. & Kelly, M. Tradeoffs between lidar pulse density and forest measurement accuracy. 2013. *Remote Sensing of Environment* 130: 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.024>
- Junttila, V., Maltamo, M. & Kauranne, T. 2008. Sparse Bayesian Estimation of Forest Stand Characteristics from Airborne Laser Scanning. *Forest Sciences* 54 (5): 543-552.
- Junttila, V., Kauranne, T. & Leppänen, V. 2010. Estimation of Forest Stand Parameters from Airborne Laser Scanning Using Calibrated Plot Databases. *Forest Science* 56 (3): 257-270.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Vastaranta, M., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Pyörälä, J., Liang, X., Liu, J., Wang, Y., Kaijaluoto, R., Melkas, T., Holopainen, M. & Hyypä, H. 2015. Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies. *Forests* 2015 (6): 3218-3236. <http://dx.doi.org/10.3390/f6093218>
- Kangas, A., Päivinen R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2004. Metsän mittaus ja kartoitus. *Silva Carelica* 40. Joensuun yliopisto - Metsätieteellinen tiedekunta. 209 s.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes instituti forestalis fenniae* 108. 74 s.
- Lefsky, M. A., Hudak, A. T., Cohen, W. B. & Acker, S. A. 2005. Patterns of covariance between forest stand and canopy structure in the Pacific Northwest. *Remote Sensing of Environment* 95: 517-531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.01.004>
- Leppänen, V. J, Tokola, T., Maltamo, M., Mehtätalo, L., Pusa, T. & Mustonen, J. 2008. [Verkkodokumentti]. Automatic delineation of forest stands from lidar data. GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence. GEOgraphic Object Based Image Analysis for the 21st Century. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. XXXVIII (4/C1) Saatavissa: http://people.ualgary.ca/~gjhay/geobia/Proceedings/Sessions/GEOBIA_Proceedings_RP10_FINALc.pdf. [Viitattu 3.10.2017]
- Lindberg, E., Olofsson, K., Holmgren, J. & Olsson, H. 2012. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data.

Remote Sensing of Environment 118: 151-161.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.015>

Lindroos, O., Ringdahl, O., La Hera, P., Hohnloser, P. & Hellström, T. 2015. Estimating the Position of the Harvester Head – a Key Step towards the Precision Forestry of the Future. *Croatian Journal of Forest Engineering* 36 (2): 147-164.

Lowe, D. G. 1999. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. Proc. of the international conference on computer vision, Corfu.

Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M. A., White, J. C., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2017. Assessing Precision in Conventional Field Measurements of Individual Tree Attributes. *Forests* 8 (2). <http://dx.doi.org/10.3390/f8020038>

Maltamo, M., Bollandsås, O. M., Næsset, E., Gobakken, T. & Packalén, P. 2011. Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 84 (1): 23-31. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpq039>

McRoberts, R. E., Næsset, E. & Gobakken, T. 2015. Optimizing the k-Nearest Neighbors technique for estimating forest aboveground biomass using airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment* 163: 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.026>

Melkas, T. & Hämäläinen, J. 2015. [Verkkodokumentti]. Hakkuukoneella kerätyn puustotiedon hyödyntäminen. Metsätehon raportti 237. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_237_Hakkuukoneella_keratyn_puustotiedon_hyodyntaminen_tm_jh.pdf. [Viitattu 13.4.2016]

Melkas, T. & Riekk, K. 2017. [Verkkodokumentti]. Hakkuualueen rajan muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 5/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tuloskalvosarja_2017_05_Hakkuualueen_rajaa_muodostus.pdf. [Viitattu 15.8.2017]

Melkas, T. & Riekk, K. 2017b. [Verkkodokumentti]. Puiden paikannustarkkuus hakkuukoneen tallennettuun sijaintiin ja kouran anturointiin perustuen – laskennallinen

algoritmi kouran sijainnin tarkentamiseksi. Metsätehon tulokalvosarja 9/2017.
[Käsikirjoitus]

Metsäntutkimuslaitos. 2014. Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Suomen virallinen tilasto: Maa-, metsä- ja kalatalous. 428 s.

Moeur, M. & Stage, A. R. 1995. Most similar neighbor: An improved sampling inference procedure for natural resource planning. *Forest Science* 41 (2): 337-359.

Næsset, E. 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 52 (2): 49-56.
[https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(97\)83000-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(97)83000-6)

Næsset, E. 1997b. Estimating Timber Volume of Forest Stands Using Airborne Laser Scanner Data. *Remote Sensing of Environment* 61 (2): 246-253.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00041-2)

Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80 (1): 88-99. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00290-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00290-5)

Næsset, E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19 (2): 164-179.
<http://dx.doi.org/10.1080/02827580310019257>

Næsset, E. 2004b. Accuracy of Forest Inventory Using Airborne Laser scanning: Evaluating the First Nordic Full-scale Operational Project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 554-557. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580410019544>

Nelson, R., Krabill, W. & Maclean, G. 1984. Determining Forest Canopy Characteristics Using Airborne Laser Data. *Remote Sensing of Environment* 15 (3): 201-212. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90031-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90031-2)

Nilsson, M. 1996. Estimation of Tree Heights and Stand Volume Using an Airborne Lidar System. *Remote Sensing of Environment* 56 (1): 1-7.
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00224-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00224-3)

- Närhi, M., Maltamo, M., Packalén, P., Peltola, H. & Soimasuo, J. 2008. Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisyyden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmätietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1: 5-15.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2006. Predicting the Plot Volume by Tree Species Using Airborne Laser Scanning and Aerial Photographs. *Forest Science* 52 (6):611-622.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109 (3): 328-341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.005>
- Packalén, P., Suvanto, A. & Maltamo, M. 2009. A two stage method to estimate species-specific growing stock. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 75 (12): 1451-1460. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.12.1451>
- Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U. & Olsson, H. 2004. Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XXXVI (8/W2): 204-207.
- Persson, Å., Söderman, U., Töpel, J. & Ahlberg, S. 2005. [Verkkodokumentti]. Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser scanning 2005*. ISPRS Archives XXXVI: 103-108. Saatavissa: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/103.pdf>. [Viitattu 6.10.2017]
- Pesonen, A., Maltamo, M., Eerikäinen, K., Packalen, P. 2008. Airborne laser scanning-based prediction of coarse woody debris volumes in a conservation area. *Forest Ecology and Management* 255 (8-9): 3288-3296. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.02.017>
- Rasinmäki, J. & Melkas, T. 2005. A Method for estimating tree composition and volume using harvester data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20 (1): 85-95. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580510008185>
- Reitberger, J., Krzystek, P & Stilla, U. 2008. Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1407-1431. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701736448>

- Reynolds, M. R., Burk, T. E. & Huang, W. 1988. Goodness-of-Fit Tests and Model Selection Procedures for Diameter Distribution Models. *Forest Science* 34: 373-399.
- Räsänen, T., Aaltonen, A., Lindroos, J., Lukkarinen, E. & Vuorenpää, T. 1998. Puustotiedon hankinta hakkuukoneella. [Verkkodokumentti]. *Metsätehon raportti* 44. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/metsatehon_raportti_044.pdf. [Viitattu 21.12.2017]
- Skogforsk. 2017. [Verkkodokumentti]. StanForD 2010 – modern communication with forest machines. Saatavissa: <http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/> [Viitattu: 25.1.2017]
- Solodukhin, V., Zukov, A. & Mazugin, L. 1977. Possibilities of laser aerial photography for forest profiling. *Lesnoe Khozyaisto (Metsänhoito)* 10: 53-58 (venäjän kielellä).
- Stendahl, J. & Dahlin, B. 2002. Possibilities for Harvester-based Forest Inventory in Thinnings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17 (6): 548-555. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580260417206>
- Suomen metsäkeskus. 2016. [Verkkodokumentti]. Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon laatuseloste. Saatavissa: https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/metsavaratiedon_laatuseloste.pdf. [Viitattu 26.9.2017]
- Suomen metsäkeskus. 2017. [www-sivusto]. Kamera-tuet. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/kamera-tuet>. [Viitattu 31.10.2017]
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 413-428.
- Söderberg, J. 2015. A method for using harvester data in airborne laser prediction of forest variables in mature coniferous stands. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för skoglig resurshushållning. Pro Gradu. Saatavissa: https://stud.epsilon.slu.se/8496/7/soderberg_%20j_150918.pdf. [Viitattu 7.9.2017]
- Tipping, M. E. 2004. Bayesian inference: An introduction to principles and practice in machine learning. *Advanced Lectures on machine learning*: 41-62.

- Tomppo, E. & Katila, M. 1991. Satellite Image-Based National Forest Inventory of Finland. 1991 International geoscience and remote sensing symposium – Remote sensing: Global monitoring for earth management (IGARSS'91)
- Treitz, P., Lim K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D. & Etheridge, D. 2012. LiDAR Sampling Density for Forest Resource Inventories in Ontario, Canada. *Remote Sensing* 4: 830-848. <https://doi.org/10.3390/rs4040830>
- Valbuena, R., Mauro, F., Arjonilla F. J. & Manzanera, J. A. 2011. Comparing airborne laser scanning-imagery fusion methods based on geometric accuracy in forested areas. *Remote Sensing of Environment* 115 (8): 1942-1954. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.017>
- Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, A., Hovi, A. & Holopainen, M. 2011. Mapping of snow-damaged trees based on bitemporal LiDAR data. *European Journal of Forest Research* 131 (4): 1217-1228. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0593-2>
- Vehmas, M., Eerikäinen, K., Peuhkurinen, J., Packalen, P. & Maltamo, M. 2011. Airborne Laser Scanning for the Site Type Identification of Mature Boreal Forest Stands. *Remote Sensing* 3: 100-116. <https://doi.org/10.3390/rs3010100>
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C. & Ducic, V. 2008. 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1433-1452. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160701736398>
- Wehr, A. & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54 (2-3): 68-82. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00011-8)
- White, J. C., Wulder, M.A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D, Pitt, D. & Woods, M. 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach (Version 2.0). *Forestry Chronicle* 89 (6): 722-723.
- Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H. & Maltamo, M. 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90 (4): 451–462. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.001>

Yu, X., Hyypä, J., Litkey, P., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2017. Single-Sensor Solution to Tree Species Classification Using Multispectral Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing* 9 (2). <http://dx.doi.org/10.3390/rs9020108>

LIITTEET

Liite1. Piirrelaskennassa käytetyt parametrit.

Etuliite	Käytetyt parametrit	Arvo
<i>L_X</i>	Ground threshold	2
<i>Lidar30M</i>	Ground threshold	2
<i>Lidar30M</i>	High vegetation threshold	5
<i>L_L30M5</i>	Ground threshold	5
<i>L_L30M5</i>	High vegetation threshold	5
<i>L_L30M7</i>	Ground threshold	7
<i>L_L30M7</i>	High vegetation threshold	5
<i>R12</i>	ndvi1_low (skaalaukseen)	-0.35
<i>R12</i>	ndvi1_high (skaalaukseen)	0.15
<i>R12</i>	ndvi2_low (skaalaukseen)	-0.6
<i>R12</i>	ndvi2_high (skaalaukseen)	-0.2
<i>R12</i>	grad_coefficient	7
<i>Kaiuista käytetään first/only, ellei toisin mainittu.</i>		

Liite 2. Laskettujen piirteiden selitteet.

Piirre	Kuvaus
<i>L_X_VD</i>	Laserpisteet maanpinnan (Ground threshold) yläpuolelta jaettuna kaikilla laserpisteillä.
<i>L_X_ZP85</i>	Sen laserkaiun korkeus, jonka alapuolelle jäävien kaikujen korkeuden summa on 85% kaikkien laserkaikujen korkeuksien summasta.
<i>L_X_ZP95</i>	Sen laserkaiun korkeus, jonka alapuolelle jäävien kaikujen korkeuden summa on 95% kaikkien laserkaikujen korkeuksien summasta.
<i>L_L30M_01</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 10% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_02</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 20% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_03</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 30% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_04</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 40% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_05</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 50% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_06</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 60% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_07</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 70% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_08</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 80% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_09</i>	Ensimmäisen kaiun korkeus, kun 90% kaiuista ovat alapuolella.
<i>L_L30M_27</i>	Korkean kasvillisuuden raja-arvon ylittävien ensimmäisten kaikujen keskimääräinen korkeus.
<i>L_L30M_28</i>	Korkean kasvillisuuden raja-arvon ylittävien ensimmäisten kaikujen z-koordinaattien keskihajonta.
<i>L_L30M_29</i>	Maanpintaan osuvien ensimmäisten kaikujen suhde ensimmäisten kaikujen kokonaismäärään.
<i>L_L30M5_29</i>	Maanpintaan osuvien ensimmäisten kaikujen suhde ensimmäisten kaikujen kokonaismäärään.
<i>L_L30M7_29</i>	Maanpintaan osuvien ensimmäisten kaikujen suhde ensimmäisten kaikujen kokonaismäärään.
<i>L_VD8530VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.3 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 85% kaiuista heijastunut.
<i>L_VD8580VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.8 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 85% kaiuista heijastunut.
<i>L_VD9030VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.3 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 90% kaiuista heijastunut.
<i>L_VD9080VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.8 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 90% kaiuista heijastunut.
<i>L_VD9530VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.3 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 95% kaiuista heijastunut.
<i>L_VD9580VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. X=0.8 kertaa korkeus, jonka alapuolelta 95% kaiuista heijastunut.

<i>L_VD9550VD</i>	Kaikujen lukumäärä korkeuden X alapuolelta, jaettuna kaikkien kaikujen lukumäärällä. $X=0.5$ kertaa korkeus, jonka alapuolelta 95% kaiuista heijastunut.
<i>C_N_MIN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_P25</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_P50</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_P75</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_MAX</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N_SD</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_MIN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_P25</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_P50</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_P75</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_MAX</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_R_SD</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_MIN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_P25</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_P50</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_P75</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_MAX</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_G_SD</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_MIN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 0%.

<i>C_I_P25</i>	Värjätyn LiDarin R-,G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_P50</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_P75</i>	Värjätyn LiDarin R-, G-, ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_MAX</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_I_SD</i>	Värjätyn LiDarin RGB-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 0%.
<i>C_N10_MIN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_P25</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_P50</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_P75</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_MAX</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N10_SD</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_MIN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_P25</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_P50</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_P75</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_MAX</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_R10_SD</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_MIN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_P25</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_P50</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_P75</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.

<i>C_G10_MAX</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_G10_SD</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_MIN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_P25</i>	Värjätyn LiDarin R-,G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_P50</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_P75</i>	Värjätyn LiDarin R-, G-, ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_MAX</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_I10_SD</i>	Värjätyn LiDarin RGB-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%.
<i>C_N50_MIN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_P25</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_P50</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_P75</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_MAX</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N50_SD</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_MIN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_P25</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_P50</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_P75</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_MAX</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_R50_SD</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 50%.

<i>C_G50_MIN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_P25</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_P50</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_P75</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_MAX</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_G50_SD</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_MIN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_P25</i>	Värjätyn LiDarin R-,G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_P50</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_P75</i>	Värjätyn LiDarin R-, G-, ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_MAX</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_I50_SD</i>	Värjätyn LiDarin RGB-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 50%.
<i>C_N80_MIN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_P25</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_P50</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_P75</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_MAX</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_N80_SD</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapuna-kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_MIN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_P25</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_P50</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.

<i>C_R80_P75</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_MAX</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_R80_SD</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_MIN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_P25</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_P50</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_P75</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_MAX</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskiarvo. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_G80_SD</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskihajonta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_MIN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo viimeiseltä kaiulta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_P25</i>	Värjätyn LiDarin R-,G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_P50</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_P75</i>	Värjätyn LiDarin R-, G-, ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_MAX</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_I80_SD</i>	Värjätyn LiDarin RGB-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 80%.
<i>C_NI_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyn viimeisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_NI_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_NI_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_NI_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_NI_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyn ensimmäisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.

<i>C_N1_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_N1_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>C_N2_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyn viimeisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyn ensimmäisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N2_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyn viimeisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyn ensimmäisen kaiun arvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>C_N3_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Suhteellinen Zmin 10%. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>R_HNIR_01</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 1. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_02</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 2. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_03</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 3. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_04</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 4. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_05</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 5. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_06</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 6. tekstuuripiirre

<i>R_HNIR_07</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 7. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_08</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 8. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_09</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 9. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_10</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 10. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_11</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 11. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_12</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 12. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_13</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 13. tekstuuripiirre
<i>R_HNIR_14</i>	Lähi-infrapunakanavalta laskettu Haralickin 14. tekstuuripiirre
<i>R_R12_01</i>	NDVI1- kuvalta $((NIR-RED)/(NIR+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 1. luokka.
<i>R_R12_02</i>	NDVI1- kuvalta $((NIR-RED)/(NIR+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 2. luokka.
<i>R_R12_03</i>	NDVI1- kuvalta $((NIR-RED)/(NIR+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 3. luokka.
<i>R_R12_04</i>	NDVI1- kuvalta $((NIR-RED)/(NIR+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 4. luokka.
<i>R_R12_05</i>	NDVI2- kuvalta $((GREEN-RED)/(GREEN+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 1. luokka.
<i>R_R12_06</i>	NDVI2- kuvalta $((GREEN-RED)/(GREEN+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 2. luokka.
<i>R_R12_07</i>	NDVI2- kuvalta $((GREEN-RED)/(GREEN+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 3. luokka.
<i>R_R12_08</i>	NDVI2- kuvalta $((GREEN-RED)/(GREEN+RED))$ lasketun neliluokkaisen histogrammin 4. luokka.
<i>R_R12_09</i>	NDVI1:n muutosta kuvaavalta gradienttikuvulta lasketun neliluokkaisen histogrammin 1. luokka.
<i>R_R12_10</i>	NDVI1:n muutosta kuvaavalta gradienttikuvulta lasketun neliluokkaisen histogrammin 2. luokka.
<i>R_R12_11</i>	NDVI1:n muutosta kuvaavalta gradienttikuvulta lasketun neliluokkaisen histogrammin 3. luokka.
<i>R_R12_12</i>	NDVI1:n muutosta kuvaavalta gradienttikuvulta lasketun neliluokkaisen histogrammin 4. luokka.
<i>R_NMEAN</i>	Ilmakuvalta laskettu lähi-infrapuna -kanavan keskiarvo
<i>R_NSD</i>	Ilmakuvalta laskettu lähi-infrapuna -kanavan keskihajonta
<i>R_RMEAN</i>	Ilmakuvalta laskettu punaisen kanavan keskiarvo
<i>R_RSD</i>	Ilmakuvalta laskettu punaisen kanavan keskihajonta

<i>R_GMEAN</i>	Ilmakuvalta laskettu vihreän kanavan keskiarvo.
<i>R_GSD</i>	Ilmakuvalta laskettu vihreän kanavan keskihajonta.
<i>N1_HND_01</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 1. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_02</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 2. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_03</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 3. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_04</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 4. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_05</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 5. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_06</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 6. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_07</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 7. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_08</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 8. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_09</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 9. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_10</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 10. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_11</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 11. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_12</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 12. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_13</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 13. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_HND_14</i>	NDVI1- kovalta laskettu Haralickin 14. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_SMEAN</i>	NDVI1-kuvan keskiarvo. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N1_SSD</i>	NDVI1-kuvan keskihajonta. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>N2_HND_01</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 1. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_02</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 2. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_03</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 3. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_04</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 4. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_05</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 5. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_06</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 6. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.

<i>N2_HND_07</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 7. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_08</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 8. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_09</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 9. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_10</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 10. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_11</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 11. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_12</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 12. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_13</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 13. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_HND_14</i>	NDVI2- kovalta laskettu Haralickin 14. tekstuuripiirre. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_SMEAN</i>	NDVI2-kuvan keskiarvo. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>N2_SSD</i>	NDVI2-kuvan keskihajonta. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N2_MIN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_P25</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_P50</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_P75</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_MAX</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan keskiarvo. Zmin kaksi metriä.
<i>A_N2_SD</i>	Värjätyn LiDarin lähi-infrapunakanavan keskihajonta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_MIN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_P25</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_P50</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_P75</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_MAX</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskiarvo. Zmin kaksi metriä.
<i>A_R2_SD</i>	Värjätyn LiDarin punaisen kanavan keskihajonta. Zmin kaksi metriä.

<i>A_G2_MIN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo viimeiseltä kaiulta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_P25</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_P50</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_P75</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_MAX</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan arvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskiarvo. Zmin kaksi metriä.
<i>A_G2_SD</i>	Värjätyn LiDarin vihreän kanavan keskihajonta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_MIN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo viimeiseltä kaiulta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_P25</i>	Värjätyn LiDarin R-,G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_P50</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_P75</i>	Värjätyn LiDarin R-, G-, ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_MAX</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvo ensimmäisen kaiun korkeudelta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_MEAN</i>	Värjätyn LiDarin R-, G- ja B-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskiarvo. Zmin kaksi metriä.
<i>A_I2_SD</i>	Värjätyn LiDarin RGB-kanavan väri-intensiteetin keskiarvojen keskihajonta. Zmin kaksi metriä.
<i>A_NI2_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyn viimeisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyn ensimmäisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_NI2_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja punaista kanavaa.
<i>A_N22_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyn viimeisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.

<i>A_N22_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N22_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N22_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N22_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn ensimmäisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N22_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N22_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty lähi-infrapunaa ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_MIN</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn viimeisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_P25</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 25% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_P50</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 50% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_P75</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn kaiun arvo korkeudelta, jonka alapuolelta 75% kaiuista tulee. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_MAX</i>	NDVI-kuvalla värjätyyn ensimmäisen kaiun arvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_MEAN</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskiarvo. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.
<i>A_N32_SD</i>	NDVI-kuvalla värjättyjen kaikujen keskihajonta. Zmin kaksi metriä. NDVI:n kaavassa käytetty punaista ja vihreää kanavaa.