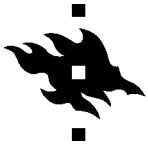


Metsävarojen kartoitus TerraSAR-X -stereomittauksella tuotetun 3D-tiedon avulla

Metsien ekologian ja käytön pro gradu -tutkielma
maatalous- ja metsätieteiden maisterin tutkintoa varten

Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
2013

Mikko Niemi



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author Mikko Niemi			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Metsävarojen kartoitus TerraSAR-X -stereomittauksella tuotetun 3D-tiedon avulla			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterin tutkielma		Aika/Datum – Month and year Lokakuu 2013	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 58 sivua + liitteet 2 sivua
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Metsävarojen inventointiin tarvittaisiin ympäri maailman entistä tarkempaa ja edullisempää kaukokartoitusmenetelmää, jonka avulla metsävaratiedot voitaisiin myös päivittää nopeasti. Optisiin satelliittikuviin perustuva puustotulkinta on epätarkkaa ja nopeasti saturoituvaa. Lentolaserkeilaus olisi tarkka kartoitusmenetelmä, mutta sen kustannukset ovat suuret ja inventointiprosessi on hidas. Uudet, korkearesoluutioisia tutkakuvia ottavat satelliitit ovat viime vuosina lisänneet tutkijoiden kiinnostusta SAR-kuvien (Synthetic Aperture Radar) hyödyntämiseen luonnonvarojen kartoituksessa.</p> <p>Maisterin tutkielmassa tarkasteltiin stereokuvamittauksella TerraSAR-X -kuvista tuotettua 3D-tietoa (eng. SAR radargrammetry) metsävarojen inventoinnissa. Radargrammetriassa tutkasatelliitin ottamasta stereokuvaparista etsitään vastinpisteitä, joiden sijainti paikannetaan. Havaintojen korkeus maanpinnasta saatiin erotuksena laserkeilattuun maastomalliin. Stereokuvamittattua 3D-pistepilveä käytettiin opinnäytetyössä puustotunnusten estimointiin aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin menetelmillä.</p> <p>Koalatasolla radargrammetria tuotti puuston kokonaistilavuuden, biomassan, pohjapinta-alan ja keskipituuden estimointitarkkuuksiksi (suhteellinen RMSE) 40,3 %, 39,9 %, 34,0 % ja 15,9 %. Yli 2 hehtaarin metsikkökuvioilla vastaavat tarkkuudet olivat 20,2 %, 20,4 %, 36,1 % ja 6,9 %. Ainoastaan pohjapinta-alan arviointi ei tarkentunut kuviokoon kasvaessa.</p> <p>Yhteenvedon voidaan todeta, että radargrammetrian perusteella puiden latvusten korkeus pystytään määrittämään erittäin tarkasti, mutta puuston pohjapinta-alan kanssa pistepilvestä lasketut puuston tiheyttä kuvaavat piirteet korreloivat huonosti. Siitä huolimatta gradun tulokset puuston kokonaistilavuuden ja biomassan estimointitarkkuudesta olivat selvästi optisiin satelliittikuviin perustuvaa puustotulkintaa tarkempia.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords TerraSAR-X, tutkakuvaus, stereokuvamittaus, laserkeilaus, biomassan kartoitus			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikin tiedekirjasto ja Metsätieteiden laitos			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Laitos/Institution– Department Department of Forest Sciences	
Tekijä/Författare – Author Mikko Niemi			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Forest mapping by the radargrammetric processing of TerraSAR-X satellite images			
Oppiaine /Läroämne – Subject Forest Ecology and Management			
Työn laji/Arbetets art – Level Master’s thesis		Aika/Datum – Month and year October 2013	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 58 pages + appendixes 2 pages
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Accurate and economical remote sensing method with good temporal resolution is required for mapping up-to-date information about the forest resources. Detecting forests by optical satellite images is an inaccurate procedure with the saturation problem. Airborne laser scanning (ALS) is a precise application, but the inventory process is slow and expensive. Recently the new synthetic aperture radar (SAR) satellites with a high spatial resolution have caused a renaissance of radar-based remote sensing.</p> <p>The purpose of the master’s thesis was to investigate the accuracy of forest mapping by radargrammetric processing of TerraSAR-X satellite images. The radargrammetry is based on stereoscopic measurement, which calculates 3D coordinates for corresponding points of the SAR image pair. In the research an area-based approach (ABA) was utilized to estimate forest attributes from the 3D points, and digital terrain model (DTM) produced by ALS was used to calculate height of the corresponding points.</p> <p>In plot-level the relative RMSEs for stem volume, biomass, basal area and mean height were 40.3 %, 39.9 %, 34.0 % and 15.9 %. In stands larger than 2 hectares the corresponding RMSEs were 20.2 %, 20.4 %, 36.1 % and 6.9 %. It’s notable that the estimation of basal area didn’t improve in stand-level at all.</p> <p>According to the research SAR radargrammetry is a precise technology to estimate forest canopy height, but the mapping of forest density is very unclear. Nevertheless the results about the estimation accuracy of forest stem volume and biomass by SAR radargrammetry were clearly better than the comparable estimation accuracy of optical satellite images.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords TerraSAR-X, radar imaging, stereoscopic measurement, laser scanning, biomass mapping			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Viikki Science Library and Department of Forest Sciences			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Alkusanat

Haluan kiittää Metsätieteiden laitokselta Markus Holopaista ja Mikko Vastarantaa mielenkiintoisen projektin organisoimisesta sekä saamastani tuesta työn edetessä. Kiitokset myös Geodeettisen laitoksen Mika Karjalaiselle opinnäytetyössä käytetystä stereokuvamitatusta aineistosta ja avusta aineiston käsittelyssä.

Lämmin kädenpuristus Arbonaut Oy:lle, erityisesti Jussi Peuhkuriselle, tutkielman ohjauksesta, työhön liittyvien ongelmien pohtimisesta kanssani sekä työtilojen ja ohjelmistojen tarjoamisesta. Kiitokset myös Katri Tegelille ja Petri Latva-Käyrälle mukavasta työseurasta sekä avusta lukemattomissa eri ongelmissa. Kiitokset vielä Raita Säynäjoelle perehdyttämisestäni Arbonautin kuviointialgoritmien saloihin.

Helsingissä 25.10.2013

Mikko Niemi

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Yleisimmät metsävarojen kaukokartoitusmenetelmät	2
1.2.1 Optisen alueen satelliittikuvat	3
1.2.2 Laserkeilaus.....	4
1.2.3 Tutkasatelliittikuvat.....	6
1.3 3D-tiedon irrottaminen tutkasatelliittikuvista	7
1.4 Metsikkökuviot inventointi- ja suunnitteluyksikköinä	9
1.5 Laajojen alueiden strategiseen suunnitteluun liittyvä inventointi	10
1.6 Tutkimuksen tavoitteet.....	11
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	12
2.1 Tutkimusalue	12
2.2 Laserkeilausaineisto	13
2.3 Stereokuvamitattu SAR-aineisto.....	14
2.4 Maastomallien tuottaminen ja tarkastelu	17
2.5 Metsäalueiden rajaaminen tutkimusalueelta	18
2.6 Maastokoealat	19
2.6.1 Aiemmin mitatut koealat ja lisäkoelajien valinta	19
2.6.2 Koelamittaukset.....	21
2.6.3 Metsävaratiedon laskenta koelajoille	21
2.6.4 Eri ajankohdilta olevat aineistot	22
2.7 Koelakohtaisen metsävaratiedon estimointi.....	25
2.7.1 Kaukokartoituspiirteiden irrotus maastokoealoille	25
2.7.2 Piirrevalinta ja ristiinvalidointi.....	26
2.8 Kuvioittaisen metsävaratiedon estimointi.....	27
2.8.1 Automaattinen kuviointi.....	28
2.8.2 Metsävaratiedon laskenta kuvioille.....	31
2.9 Monilähteyinen valtakunnan metsien inventointi	32

3. TULOKSET	33
3.1 SAR-radargrammetrialla tuotetun maastomallin tarkkuus	33
3.2 Koealoille irrotettujen ALS- ja SAR-piirteiden vertailu	36
3.3 Metsävaratiedon estimoinnin tarkkuus koealatasolla	39
3.4 Metsävaratiedon estimoinnin tarkkuus kuviotasolla.....	42
4. POHDINTA.....	48
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	52
LÄHTEET	53
LIITTEET	59

KÄYTETYT LYHENTEET

2D	2-dimensional
3D	3-dimensional
ABA	Area-based approach
AGB	Aboveground biomass
ALS	Airborne laser scanning
BA	Basal area
CHM	Canopy height model
Dg	Mean diameter
DSM	Digital surface model
DTM	Digital terrain model
dZ	delta elevation
GPS	Global positioning system
Hg	Mean height
ITD	Individual tree detection
LiDAR	Light detecting and ranging
MSN	Most similar neighbor
MVMI	Monilähteinen valtakunnan metsien inventointi
RaDAR	Radio detecting and ranging
RMSE	Root mean square error
RMSE%	Suhteellinen RMSE
SAR	Synthetic aperture radar
VOL	Stem volume
VRS	Virtual reference station
VMI	Valtakunnan metsien inventointi

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Metsien kestävän ja monitavoitteisen käytön suunnittelua ja hallintaa varten tarvitaan ympäri maailman tarkkaa, nopeasti päivitettävää ja kustannustehokkaasti tuotettua tietoa metsien ominaisuuksista. Maailmanlaajuisesti ollaan yleensä kiinnostuneita kasvillisuuteen sitoutuneen biomassan ja hiilen määrän kartoittamisesta, sekä ympäristössä tapahtuneiden muutosten seurannasta. Pohjoismaissa metsätalouden toimenpiteiden suunnittelu ja toteutus vaativat sen sijaan erittäin tarkkaa kuvioittain kerättyä metsävaratietoa, joka sisältää arvion kuvion puuston keskipituudesta ja pohjapinta-alasta puulajeittain, sekä puuston runkotilavuudesta puutavaralajeittain.

Metsävarojen inventoinnissa hitaita ja kalliita maastomittauksia on vuosikymmeniä pyritty korvaamaan erilaisilla kaukokartoitusmenetelmillä. Yksi ajankohtaisimmista kaukokartoitukseen liittyvistä tutkimusaiheista on synteettisen apertuurin tutkan (SAR) hyödyntäminen ympäristön kartoituksessa. SAR:n etuja ovat kuvauksen riippumattomuus sää- ja valaistusolosuhteista, sekä satelliittiin perustuvan inventoinnin nopeus ja hyvä toistettavuus. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin radargrammetriaan, jossa kohteet paikannetaan tutkasatelliitin ottaman stereokuvaparin avulla.

Pro gradu on jatkoa Metsätieteiden laitoksen ja Geodeettisen laitoksen yhteistyönä tekemälle SAR-radargrammetrian käyttöön metsävarojen hallinnassa liittyvälle tutkimukselle. Yhteistyön tuloksena on aiemmin julkaistu kyseisestä aihepiiristä kolme tutkimusta: Karjalainen ym. (2012) tutkivat radargrammetrian tarkkuutta puustotunnusten inventoinnissa koealatasolla, Vastaranta ym. (2012a) vertasivat radargrammetriaa ja laserkeilausta latvuston korkeuden arvioinnissa, ja Vastaranta ym. (2013) vertasivat radargrammetrialla ja laserkeilauksella tuotettuja puustotunnusten koealataso-estimaatteja toisiinsa. Gradun tavoitteena on pohtia radargrammetrian sovellusmahdollisuuksia ja ongelmia, sekä viedä aiheeseen liittyvä tutkimus metsätalouden suunnittelua ja operatiivisia toimenpiteitä tukevalle kuviotasolle.

1.2 Yleisimmät metsävarojen kaukokartoitusmenetelmät

Luonnonvarojen kartoituksessa on käytetty jo vuodesta 1972 lähtien Landsat-satelliittien ottamia kuvia, joiden avulla on voitu seurata vuodenajoittain esimerkiksi kaupungistumisen etenemistä ja trooppisten metsien häviämistä. Suomessa optisen alueen satelliittikuvien hyödyntäminen metsäntutkimuksessa alkoi 1980-luvun lopulla kahdeksannen valtakunnan metsien inventoinnin (VMI8) aikana, jolloin puustotunnukset inventoitiin pienille alueille maastossa kerätyn aineiston ja satelliittikuvien sävyarvojen välisen riippuvuuden perusteella. Esimerkiksi kunnittaiset metsävarat inventoidaan edelleen monilähteisellä VMI:llä (MVMI), jossa hyödynnetään sekä maastomittauksia että satelliittikuvilta irrotettuja tietoja.

Lentolaserkeilaus (ALS) on 2000-luvulla noussut valtamenetelmäksi luonnonvarojen yksityiskohtaisessa kaukokartoituksessa etenkin Pohjoismaissa, koska sen avulla ympäristöstä saadaan erittäin tarkka maastomalli (DTM). ALS tuottaa myös kasvillisuudesta runsaasti havaintoja, joiden avulla metsävarat voidaan inventoida tarkasti ja kustannustehokkaasti. Suomessa ALS on 2010-luvulla vakiintunut Metsäkeskuksen ja useiden suurten metsänomistajien käyttämäksi metsävaratietojen inventointimenetelmäksi, ja muutaman vuoden kuluttua koko valtakunnasta on saatavissa aluepohjaisella laserkeilauksella (ABA) tuotettu kuvioittainen metsävaratieto. Tietojen päivityksen kannalta ALS:n ongelma on lentokoneesta tehtävän inventoinnin hitaus ja kalleus. Satelliitteihin perustuvalla tarkalle luonnonvarojen kartoitusmenetelmälle olisi kysyntää, sillä satelliitteja käyttämällä saavutettaisiin pienemmin kustannuksin parempi temporaalinen resoluutio, eli inventoinnin toistettavuus, kuin ALS:lla.

Tutkasatelliittikuvat ovat olleet 1970-luvun lopulta lähtien tärkeä menetelmä tiedustelussa ja ympäristön kartoituksessa. Vielä vuosituhaten vaihteessa Hyypä ym. (2000a) totesivat, että optiset satelliittikuvat sisältävät tutkasatelliittikuvia enemmän tietoa metsävaroista. Uudet, jopa 1–3 metrin spatiaalisella erotuskyvyllä kuvia ottavat tutkasatelliitit, kuten TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, Radarsat-2 ja TanDEM-X, ovat kuitenkin viime vuosina kasvattaneet huomattavasti tutkijoiden kiinnostusta tutkasatelliittien hyödyntämiseen luonnonvarojen kaukokartoituksessa.

1.2.1 Optisen alueen satelliittikuvat

Optisen alueen satelliittikuvilla on suuri merkitys ympäristön tutkimuksessa, koska niiden avulla voidaan nopeasti ja edullisesti kartoittaa laajoja alueita, sekä toistuvasti seurata esimerkiksi metsäpinta-alassa tapahtuneita muutoksia. Satelliittikuvilla on hyvä spektrinen resoluutio, eli kyky erottaa pienet muutokset kohteesta tulevan säteilyn aallonpituudessa. Menetelmän ongelmia ovat kuitenkin kuvauksen riippuvuus valaistusolosuhteista sekä pilvisuus, joka häiritsee monilla alueilla suuren osan vuodesta optisen säteilyn alueella tehtävää passiivista kaukokartoitusta.

Satelliittikuvatulkintaan perustuva puuston biomassan tai tilavuuden kartoitus on epätarkkaa koeala- ja kuviotasolla, ja tulokset saturoituvat runsaspuustoisilla alueilla. Tuominen ja Haakana (2005) estimoivat puustotunnuksia k-NN -lähimmän naapurin menetelmällä Päijät-Hämeessä Landsat 7 ETM -kuvien kuuden eri kanavan avulla, ja totesivat koealatasolla puuston kokonaistilavuudelle (VOL), pohjapinta-alalle (BA) ja keskipituudelle (Hg) estimointitarkkuuksiksi (RMSEt) 101,9 m³/ha, 9,6 m²/ha ja 7,1 m. Tuomisen ja Haakanan julkaisussa tilavuusestimaattien suhteellinen RMSE (RMSE%) oli 74,5 %. Franco-Lopez ym. (2001) käyttivät Minnesotassa USA:ssa Landsat-kuvia metsävarojen inventointiin ja raportoivat VOL:n arviointitarkkuudeksi 65 % (RMSE%). Vielä paremmista tuloksista ovat raportoineet Holopainen ym. (2009), jotka päätyivät tilavuuden estimoinnissa 58,3 % suhteelliseen RMSE:hen. Etelä-Ruotsissa vastaavassa tutkimuksessa käytettiin SPOT-4 XS -satelliitin ottamia optisia kuvia, ja puuston kokonaistilavuus arvioitiin koealatasolla 64 % virheellä (RMSE%) (Holmström & Fransson 2003). Ruotsalaistutkijat tarkastelivat tuloksia myös keskiarvoltaan 5,0 ha laajuisilla metsikkökuvioilla, jolloin tilavuusestimaattien suhteellinen RMSE parantui 33,5 %:iin.

Hyypä ym. (2000a) vertasivat Kalkkisissa eri kaukokartoitusmenetelmiä kuviotason puustotunnusten arvioinnissa ja totesivat optisten Spot XS, Spot PAN ja Landsat TM -satelliittikuvien kuvaavan puustoa selvästi paremmin kuin sen ajan tutkasatelliittikuvat ERS-1/2 PRI ja SLC. Lentokoneesta tehdyt inventoinnit AISA-spektrometrillä, profiloivalla tutkalla ja ilmakuvilla olivat selvästi satelliitteihin perustuvia kartoitusmenetelmiä tarkempia, mutta myös niiden kustannukset ovat paljon suuremmat (Hyypä ym. 2000a).

1.2.2 Laserkeilaus

Laserkeilaus (LiDAR) on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jossa laserkeilain lähettää lähi-infrapunan aallonpituusalueella olevaa säteilyä, vastaanottaa takaisin heijastuneen säteilyn ja tulkitsee etäisyyden heijastuksen aiheuttaneeseen kohteeseen säteilypulssin kulkuajan perusteella. Lentokoneesta, yleensä 500–3000 metrin korkeudesta tehtävä ALS on ratkaissut satelliittikuvatulkintaa haittaavan saturoitumisongelman, koska laserpulssit läpäisevät tiheätkin latvuskerrokset ja tuottavat havain-toja myös latvuston alaosasta ja maasta. Yksi laserkeilaimen lähettämä pulssi saattaa tuottaa kohteesta useita paluukaikuja: ensimmäisen kaiun latvuston yläosasta, mah-dollisia välikaikuja latvuston keskeltä ja viimeisen kaiun maasta. ALS:n tuotoksena inventoitavasta alueesta saadaan 3D-pistepilvi, joka sisältää tiedon kaikujen sijainnis-ta ja laadusta: ensimmäinen, keskimäinen, viimeinen tai ainoa kaiku.

Keilaimen tuottamien tarkkojen maahavaintojen ansiosta ALS on vakiintunut valta-menetelmäksi maastomallin (DTM) tuottamisessa. Kraus ja Pfeifer (1998) tutkivat Itävallassa ALS:lla tuotetun DTM:n tarkkuutta puustoisilla alueilla, ja raportoivat tasaisilla alueilla DTM:n tarkkuudeksi ± 25 cm. Aineiston jatkokäsittelyn ja syste-maattisten virheiden poistamisen jälkeen itävaltalaistutkijat saivat mallin parantu-maan tarkkuuteen ± 10 cm. Hyypä ym. (2000b) tarkastelivat kaltevuuden vaikutusta DTM:n tarkkuuteen puuston alla, ja havaitsivat tasaisilla alueilla 15 cm keskivirheen ja 40 % kaltevuudessa noin 40 cm keskivirheen. Reutebuch ym. (2003) raportoivat, että metsikön latvuspeitolla ei ole havumetsässä huomattavaa vaikutusta DTM:n tarkkuuteen: hakkuuaukossa mallin tarkkuus oli 16 ± 23 cm (keskivirhe \pm virheen keskiahajonta), voimakkaasti harvennetussa metsässä 18 ± 14 cm, kevyesti harvenne-tussa metsässä 18 ± 18 cm ja hakkaamattomassa metsässä 31 ± 29 cm. ALS:n lento- korkeus, keilauksen vuodenaika, maaston kaltevuus, metsän latvuspeitto ja kenttä-kerroksen kasvillisuus vaikuttavat DTM:n tuottamiseen, mutta yleisesti jyrkkiä rinteitä lukuun ottamatta boreaalisissa metsissä päästään alle 20 cm tarkkuu-teen (Hyypä ym. 2005).

Laserkeilausaineiston avulla on pyritty estimoimaan puustotunnuksia kahdella erilai-sella lähestymistavalla. ABA perustuu oletukseen, että tarkasti mitattujen koalojen puustotunnusten ja 3D-laserpisteaineistosta irrotettujen piirteiden välillä on olemassa

vahva, mallinnettava riippuvuus. ABA:ssa mallinnettavien puustotunnusten selittävinä muuttujina on käytetty havaintojen korkeusjakaumasta laskettuja prosenttipisteitä eli persenttiilejä, korkeusjakauman maksimi- ja keskiarvoja sekä pulssien korkeushajontaan liittyviä, puuston tiheyttä kuvaavia tunnuksia (Næsset 2002).

Eriyisesti Pohjoismaissa on tutkittu ahkerasti ABA:n käyttöä metsävarojen inventoinnissa, jotta kallis kuvioittainen maastoinventointi voitaisiin syrjäyttää. Packalén ja Maltamo (2007) tutkivat itäsuomalaisissa boreaalisissa talousmetsissä puustotunnusten aluepohjaista LiDAR-inventointia havaiten puuston tilavuuden ja pohjapinta-alan estimointitarkkuuksiksi koealatasolla 41,9 m³/ha (20,5 %) (RMSE ja RMSE%) ja 4,3 m²/ha (17,2 %), ja kuviotasolla 21,1 m³/ha (10,4 %) ja 2,1 m²/ha (8,6 %). Joensuulaisten raportissa puulajikohtaisten tilavuuksien suhteelliset virheet olivat koealatasolla havupuilla 50–60 % ja lehtipuilla noin 100 %. ABA vaikuttaa toimivan yhtä hyvin myös vuoristossa, sillä Hollaus ym. (2007) havaitsivat Itävallan Alpeilla puuston kokonaistilavuuden estimointitarkkuudeksi koealatasolla 90,9 m³/ha (21,4 %). Uusissa julkaisuissa Kankare ym. (2013) totesivat Evolla tilavuuden ja biomassan (AGB) arviointitarkkuuksiksi koealatasolla 24,9 % ja 26,4 % RMSE%:t, ja vastaavasti Vastaranta ym. (2013) raportoivat Espoonlahdella 24,7 % ja 23,4 % virheistä. Myös Tuominen ja Haapanen (2013) totesivat kahdella eri tutkimusalueella ABA:n tarkkuudeksi sekä VOL:n että AGB:n arvioinnissa koealatasolla 23–26 %.

Vähemmän käytetty LiDAR-pohjaisen inventoinnin lähestymistapa on yksinpuintulkinta (ITD), jossa lähtökohtana on metsien inventointi yksittäisten puiden tunnistamisen ja kolmiulotteisen mittauksen kautta. Ensimmäiset lupaavat tulokset ITD:n hyödyntämisestä kuviotasoon puustotunnusten arvioinnissa saatiin jo viime vuosisadan lopulla (Hyyppä & Inkinen 1999). Matalalta lentokorkeudelta keilattua, tiheäpulsista ALS-aineistoa käyttävällä ITD:llä pystytään inventoimaan leimikon runkolukusarja ja hakkuukertymä puutavaralajeittain merkittävästi ABA:aa tarkemmin (Peuhkurinen ym. 2007). Puustotunnusten estimointia on lähestytty myös puuklustereiden kautta, eli segmentoimalla metsikön pintamalli (DSM) puuryhmiin. Breidenbach ym. (2010) inventoivat puuklustereiden kautta koealakohtaista puuston tilavuutta erittäin lupaavasti 17,1 % tarkkuudella (RMSE%), kun samalla aineistolla ABA:lla päästiin 20,6 % virheeseen. ITD on potentiaalinen, mutta ABA:aa kalliimpi ja aineiston tulkinnan kannalta haastavampi menetelmä, jota on toistaiseksi hyödyn-

netty lähinnä tutkimuskäytössä, esimerkiksi mäntypistiäistuhojen (*Diprion pini* L.) kartoituksessa (Kantola ym. 2010; 2013). Maastossa mitattujen referenssikoealojen vähentämiseksi ITD:tä voidaan myös käyttää ABA:n opetusaineistona (Vastaranta ym. 2012b).

1.2.3 Tutkasatelliittikuvat

Metsätaloudessa, erityisesti laajojen alueiden strategisessa suunnittelussa ja toimenpiteiden seurannassa, tarvittaisiin tarkkaa ja edullista kaukokartoitusmenetelmää, jolla olisi hyvä temporaalinen resoluutio. Tutkakuvaus (RaDAR) on potentiaalinen menetelmä luonnonvarojen kartoitukseen, koska se toimii auringonvalosta ja pilvisyydestä riippumatta. RaDAR on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, joka lähettää mikroaaltojen aallonpituusalueella olevia lyhyitä säteilyimpulsseja, tallentaa valaistusta kohteesta takaisinheijastuneet signaalit ja tuottaa kohteesta 2D-kuvan. Kohteen ja havaintolaitteen välinen etäisyys lasketaan lähetetyn ja vastaanotetun signaalin aikaeron perusteella.

Verrattaessa aktiivista tutkakuvausta ja passiivista, optista satelliittikuvausta, tutkan suurin etu on se, että sen käyttämät mikroaallot läpäisevät pilviä sekä osittain myös puuston latvusta, maaperää ja lunta. Tutkan lähettämä säteily on polarisoitunutta ja koherenttia, eli mikroaallot ovat keskenään samanpituiset, ovat samassa vaiheessa ja värähtelevät samassa suunnassa. Tutkan erotuskyky riippuu havaintolaitteen antennin halkaisijasta, jonka pitäisi olla sitä suurempi mitä korkeammalta kuvaus tapahtuu. Tutkasatelliittien haasteena on ollut se, että avaruudessa toimiva tutka vaatisi valtaavan antennin, sillä esimerkiksi 10 m pituisella antennilla ja 5,7 cm aallonpituudella 850 km korkeudesta operoivan tutkan spatiaalinen resoluutio olisi 4,8 km. Muutaman metrin erotuskykyyn pääseminen vaatisi epärealistisen, useiden kilometrien pituisen antennin. (Bamler 2000)

Satelliitteihin perustuvaan tutkakuvaukseen on kehitetty pitkää antennia jäljittelevä SAR-tutka, jonka spatiaalinen erotuskyky ei riipu fyysisen antennin koosta ja säteilyimpulssien aallonpituudesta. SAR-tutkakuvauksessa liikkuva havaintolaite tallentaa paluukaikujen amplitudi- ja vaihetietoja satelliitin kiertoradan eri kohdissa. Aineiston

laskennassa havainnoille suoritetaan vaihekorjaus kaiuittain, ja samasta kohteesta saatu informaatio summataan pitkän antennin simuloimiseksi. Lopputuotteena saadaan kompleksinen 2D-SAR-kuva, josta voidaan tulkita säteilyn vaihe, amplitudi tai intensiteetti. (Bamler 2000)

ALS on selvästi 2D-SAR-kuviin perustuvaa tulkintaa tarkempi kaukokartoitusmenetelmä metsävarojen inventoinnissa, eikä edes aineistojen yhdistäminen ole juuri parantanut pelkällä ALS:lla saatuja tuloksia (Hyde ym. 2007; Holopainen ym. 2010). Lyhyttä SAR-tutkan aallonpituutta käyttävän X-kanavan (aallonpituus 2,4–3,75 cm) avulla Holopainen ym. (2010) raportoivat VOL:n estimointitarkkuudeksi koealatasolla 55,8 % suhteellisen RMSE:n, mikä on hieman parempi tulos kuin Landsat- ja Spot-satelliittikuvien avulla on yleensä raportoitu. Metsäsovellusten kannalta SAR:n pisimpiä aallonpituuksia käyttävät kanavat olisivat parempia, sillä ne läpäisevät metsikön latvuston tuottaen havaintoja puiden rungoista ja maanpinnasta (Le Toan ym. 1992; Holopainen ym. 2009). Yhdistämällä L- (aallonpituus 15–30 cm) ja X-kanavien informaatiota Holopainen ym. (2009) totesivat TerraSAR-X -satelliittia simuloivalla lentokone-SAR:lla puuston kokonaistilavuuden estimointitarkkuudeksi koealatasolla 44,8 % (RMSE%).

2D-tutkakuvien perustuvan puuston biomassan kartoituksen heikkoutena on optisten kuvien tavoin tulosten saturoituminen, mikä tapahtuu C- (aallonpituus 3,75–7,5 cm), L- ja P-kanavilla (30–100 cm) vastaavasti noin 20 t/ha, 40 t/ha ja 100 t/ha biomassoissa (Imhoff 1995). Saturoitumistaso kuitenkin vaihtelee voimakkaasti eri tutkimusten välillä, koska erityisesti ilman ja kasvillisuuden kosteus vaikuttavat tutkasensorin herkkyyteen havaita vaihtelua suurista biomassoista tulleista takaisheijastuksista (Santoro ym. 2009).

1.3 3D-tiedon irrottaminen tutkasatelliittikuvista

Tutkasatelliitteihin perustuvaa luonnonvarojen kartoitusta on kehitetty irrottamalla SAR-kuvista kohteiden korkeustieto, mikä voidaan tehdä kahdella eri menetelmällä: interferometrialla tai radargrammetrialla. SAR-interferometri perustuu vähintään kahden samalta alueelta eri kuvauskulmista ja/tai eri aikaan otetun tutkakuvan välillä

olevan vaihe-eron hyödyntämiseen. Vaihe-ero lasketaan kuvan jokaiselle pikselille, minkä avulla saadaan spatiaalisesti kattava interferogrammi. Interferogrammin avulla voidaan luoda pintamalli, jonka korkeus metsässä riippuu tutkasatelliitin käyttämästä aallonpituudesta: L-kanava läpäisee hyvin latvuston ja tuottaa runsaasti havaintoja maasta, C-kanava heijastuu takaisin pääosin latvuserroksista, ja X-kanava ei läpäise latvustoa juuri lainkaan. Interferogrammin laatua voidaan tutkia laskemalla kuva-parin välille kuvien samankaltaisuutta kuvaava koherenssikuva. Metsässä koherenssi on yleensä lehtien ja oksien liikkeiden vuoksi huono, mutta koherenssin arvoa voidaan silti hyödyntää puustotulkinnassa. (Bamler & Hartl 1998)

ALS:lla tuotetun DTM:n olemassaolo ja 3D-tiedon irrottaminen SAR-kuvista ovat muuttaneet inventoinnin perusteita: tutkan lyhimpiä aallonpituuksia käyttävien X- ja C-kanavien avulla voidaan kerätä tietoa latvustosta, ja havaintojen korkeus voidaan laskea erotuksena laserkeilattuun DTM:ään. Yhdysvalloissa Kellndorfer ym. (2004) käyttivät C-kanavan interferometristä korkeutta puuston latvuston keskimääräisen korkeuden arviointiin, ja raportoivat mäntyplantaasilla Georgian osavaltiossa kuvio-tasolla 1,1 metrin RMSE:n ja kansallispuistossa Sierra Nevadan vuoristossa 4,5 metrin RMSE:n. Solberg ym. (2010) havaitsivat Norjassa X-kanavan interferometrisen korkeuden korreloivan kuviotasolla vahvasti ja saturoitumatta sekä kuusikoiden että männiköiden biomassojen kanssa. TanDEM-X -satelliittikuvista lasketun interfero-metrisen korkeuden ja ALS:lla tuotetun DTM:n perusteella norjalaiskuusikoiden VOL ja AGB onnistuttiin estimoimaan koealatasolla 43–44 % suhteellisella RMSE:llä, ja kuviotasolla 19–20 % vastaavalla tarkkuudella (Solberg ym. 2013). Eukalyptusplantaasilla, jossa puuston vertikaalinen rakenne on hyvin yhtenäinen, kuvioittainen VOL ja AGB on onnistuttu inventoimaan interferometrisen korkeuden logaritmin avulla noin 10 % suhteellisella RMSE:llä (Gama ym. 2010).

Opinnäytetyön aiheena oleva SAR-radargrammetria perustuu stereokuvamittaukseen, jossa kahdesta samalta alueelta eri kulmissa nadiiriin nähden otetuista SAR-kuvista etsitään automaattisesti vastinpisteitä. Vastinpisteet etsitään stereokuvaparista tutka-sensorin tallentaman säteilyn intensiteettiarvon perusteella, ja havainnoille lasketaan sijainti 3D-koordinaatistossa (Karjalainen ym. 2012). M. Karjalaisen (henkilökohtai-nen tiedonanto 17.5.2013) mukaan suuri haaste radargrammetriassa on vastin-pisteiden automaattinen etsintä ja automatiikan tuottamat virheelliset vastinpisteet:

vastinpiste-etsinnässä käytetään ristikorrelaatiota, joka voi tuottaa yhtenevästä kuva-informaatiosta huolimatta virheellisiä vastinpisteitä, jotka eivät todellisuudessa esitä samaa kohdetta maastossa.

Perko ym. (2011) esittivät radargrammetriaan perustuvan lähestymistavan latvuston pituusmallin (CHM) tuottamiseen: ensin X-kanavalla otetusta stereokuvaparista etsittiin metsän latvuserrosta kuvaavia vastinpisteitä DSM:n luomiseksi, minkä jälkeen CHM laskettiin DSM:n ja laserkeilatun DTM:n erotuksena. Lopuksi CHM:n tasoa kalibroitii maastoaineiston perusteella, jotta latvuston sisältä tulevat havainnot eivät aiheuta CHM:n systemaattista aliarviota. Perko ym. (2011) raportoivat lupaavasti CHM:n virheen keskihajonnan olevan metsässä alle 2 metriä. Vastarannan ym. (2012a) tutkimuksessa havaittiin vastaavalla tekniikalla puuston pituuden arvioinnille 12,2 % suhteellinen RMSE, mikä ei hävinnyt ALS:n vastaavalle tarkkuudelle (8,1 %) kovinkaan paljon. Ensimmäiset tutkimukset radargrammetriaan perustuvasta puuston tilavuuden ja biomassan estimoinnista on tiettävästi tehty Suomessa (Karjalainen ym. 2012; Vastaranta ym. 2013). Vastaranta ym. (2013) totesivat k-NN -menetelmällä koealatasolla VOL:n ja AGB:n kartoitukselle 30,2 % ja 29,9 % virheet (RMSE%).

1.4 Metsikkökuviot inventointi- ja suunnitteluyksikköinä

Operatiivisessa pohjoismaalaisessa metsäsuunnittelussa tärkein inventointiyksikkö on toistaiseksi ollut maaperän, puuston ja metsikön toimenpidetarpeiden osalta yhtenäinen metsikkökuvio. Kuviotason tulosten vertailu eri tutkimusten välillä on kuitenkin erittäin vaikeaa, koska tutkimusalueet ovat hyvin erilaisia, kuviointimenetelmät poikkeavat toisistaan ja tutkimuksissa käytetty kuviokoko vaikuttaa voimakkaasti inventointitarkkuuteen. Yleisesti tiedetään, että harhattomalla kartoitusmenetelmällä koealataso virheet kumoavat toisiaan ja tulokset paranevat kuviotasolla. Kuviokoon vaikutusta kaukokartoitus pohjaisen metsien inventoinnin tarkkuuteen on siitä huolimatta tutkittu niukasti.

Hyyppä ja Hyyppä (2001) testasivat inventoinnin tarkkuutta 1–20 ha kuvioilla, ja esittivät mallin, jonka avulla voidaan muuntaa tulokset yhdestä kuviokoosta toiseen,

ja verrata eri tutkimusten tuottamia tuloksia toisiinsa. Hyypät raportoivat virheiden pienenevän kuvioiden keskimääräisen pinta-alan kasvaessa ensin dramaattisesti ja myöhemmin maltillisemmin: eksponentiaalinen malli selitti ilmiötä hyvin kuviokoon ollessa 0–3 ha, ja tätä suuremmalla kuviokoolla riippuvuus vaikuttaa lineaariselta. Hyypien esittämää mallia on testattu gradun tuloksilla luvussa 4.

1.5 Laajojen alueiden strategiseen suunnitteluun liittyvä inventointi

Laajoja alueita hallinnoivat metsänomistajat tarvitsevat metsävarojen käytön strategiseen suunnitteluun kustannustehokkaasti tuotettua informaatiota. Esimerkiksi valtion maita hallinnoiva Metsähallitus tarvitsee laajojen alueiden strategiseen suunnitteluun tietoa metsien uudistamiskypsyydestä ja harvennustarpeista kuvioittain, sekä karkean arvion hakkuupoistumasta (Laamanen & Kangas 2011). Strategisen suunnittelun kannalta oleellisin tiedontarve on hakkuumahdollisuuksien kartoittaminen, ja tämän gradun on tarkoitus selvittää, riittäisikö SAR-radargrammetrian tarkkuus kyseisen tiedontarpeen täyttämiseen.

Laajojen alueiden inventoinnissa laserkeilauksen ongelmia ovat muun muassa suuret kustannukset ja aineistojen valtava koko. Kustannuksiltaan edullisempi menetelmä on Wulderin ym. (2012) esittämä kolmivaiheinen otanta, jossa pienen maastokoealaa-aineiston avulla opetetaan ensin ALS-tulkinta, minkä jälkeen ALS-otoksella opetetaan koko inventointialueen kattava satelliittikuvatulkinta. Menetelmän etuja ovat työvoimavaltaisten maastomittausten ja kalliin ALS:n pienempi tarve. Kanadassa Mora ym. (2013) käyttivät ALS-otosta ja erittäin korkearesoluutioisia (alle 1 m) optisia satelliittikuvia keskipinta-alaltaan 9,6 ha suuruisten metsikkökuvioiden puustotunnusten estimointiin. Kanadalaiset raportoivat suurilla kuvioilla puuston pituuden, tilavuuden ja biomassan estimointitarkkuuksiksi 2,0 m (11,6 %) (RMSE ja RMSE%), 9,6 m³/ha (12,8 %) ja 22,2 t/ha (15,8 %).

1.6 Tutkimuksen tavoitteet

Radargrammetrian avulla oli saatu aiemmissa koealatasolla tehdyissä tutkimuksissa erittäin lupaavia tuloksia puuston biomassan ja tilavuuden arvioinnista, joten gradun lähtökohtana oli selvittää menetelmän operatiivisen käytön mahdollisuuksia, ongelmia ja kehityskohteita. Tutkimuksessa keskityttiin radargrammetrialla tuotetun DTM:n tarkasteluun, laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen pistepilvien vertailuun, sekä molemmilla kaukokartoitusmenetelmillä inventoitujen koeala- ja kuviokohtaisten puustotunnusten estimaattien tarkasteluun. Tutkimuskysymykset ja niihin liittyvät oletukset on esitetty tarkemmin alla:

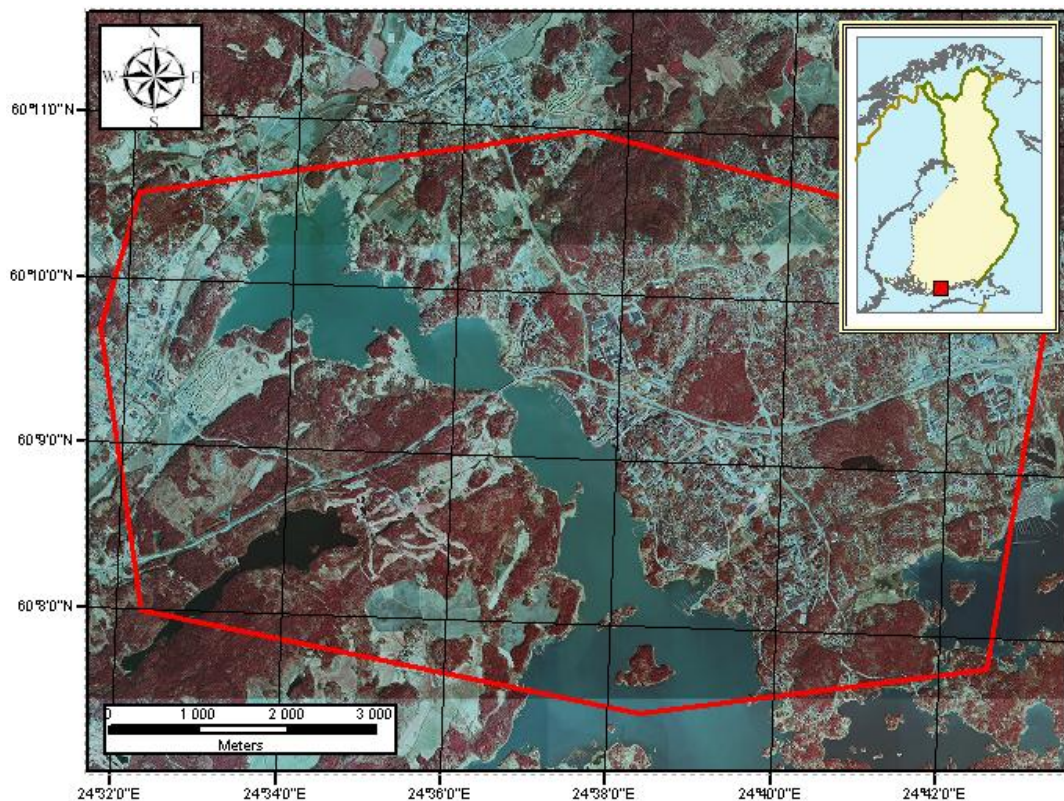
- 1) Millä tarkkuudella radargrammetrialla tuotetusta 3D-pistepilvestä voidaan tuottaa DTM, ja miten puusto vaikuttaa siihen? Referenssinä käytetään laserkeilattua DTM:ää. Tutkimuksessa oletettiin, että avoimilla alueilla radargrammetrialla saataisiin tarkka ja käyttökelpoinen DTM, mutta metsissä maahavaintojen puuttuminen johtaisi DTM:n yliarvioon.
- 2) Miten laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotetut pistepilvet poikkeavat toisistaan? Verrataan maastokoealoille irrotettuja pistepilviä, niiden korkeusjakaumia ja eri korkeuksilta laskettuja suhteellisia tiheyksiä, sekä pistepilvistä laskettujen piirteiden riippuvuutta maastossa mitatuista puustotunnuksista.
- 3) Kuinka tarkasti radargrammetrialla voidaan arvioida koealatasen metsävaratieto? Tulkinnessa käytetään k-MSN -menetelmää, ja koealatasen referenssi saadaan maastomittausten perusteella.
- 4) Kuinka tarkasti radargrammetrialla voidaan inventoida kuvioittainen metsävaratieto? Kuviointi tuotetaan Arbonautin kuviointialgoritmeilla laserkeilausaineiston pituus- ja tiheysrastereihin perustuen, ja kuvioittaisena referenssinä käytetään ALS-tulkintaa.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimusalue

Tutkimusalueeksi valittiin Espoonlahden ympäristö, josta oli saatavissa Geodeettisen laitoksen SAR-stereokuvaparit. Samaa aineistoa oli käytetty myös Karjalaisen ym. (2012) ja Vastarannan ym. (2012a; 2013) tutkimuksissa, jotka liittyivät koealatasen metsävaratiedon arviointiin SAR-radargrammetrialla.

Tutkimusalue sijaitsee Etelä-Suomessa Espoon ja Kirkkonummen kuntien alueella (kuva 1). Alueen metsille on erityistä niiden erittäin suuri maisema- ja virkistysarvo, koska ne sijaitsevat tiheästi rakennettujen alueiden välissä. Suuri osa metsistä on käsitelty siten, että maisema on pyritty pitämään jatkuvasti peitteisenä, joten alueella on runsaasti kaksijaksoisia metsiä.



Kuva 1. Ilmakuva tutkimusalueesta. Punaisella on rajattu stereokuvaparin kattama alue. Ilmakuva on Maanmittauslaitoksen Ortoilmakuvat-tietokannan aineistoa vuodelta 2010 ja pieni Suomen kartta Maanmittauslaitoksen Yleiskartta-tietokannan aineistoa 03/2013.

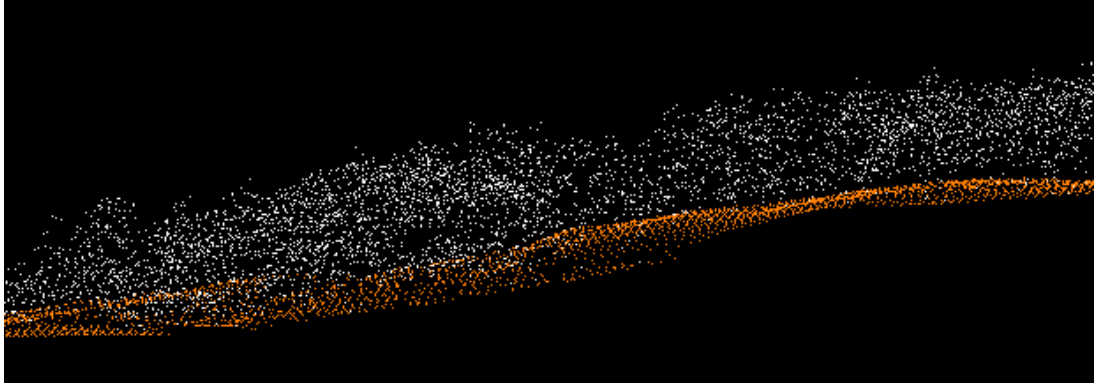
2.2 Laserkeilausaineisto

Tutkimuksessa käytettiin Maanmittauslaitoksen harvapulssista laserkeilausaineistoa, jonka oli keilannut Blom 4.5.2008. Keilaus oli tehty 1900 metrin lentokorkeudesta, aineiston pistetiheys on 0,41 pistettä/m² ja aineiston tuottajan ilmoittama havaintojen korkeustarkkuus on 0,15 metriä. Havaintojen sijainti on tallennettu ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä ja korkeus N2000-korkeusjärjestelmässä.

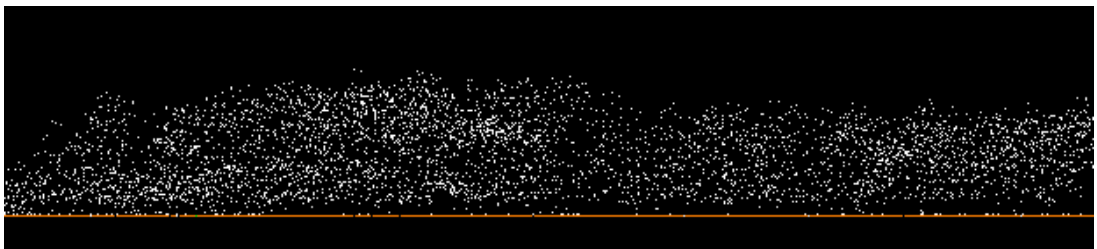
Laserpistepilven esikäsittely suoritettiin TerraScan-ohjelmistolla. Tavoitteena oli tehdä 3D-pistepilvestä DTM ja laskea kaikille kasvillisuudesta saaduille havainnoille korkeus maanpinnasta. Normalisoitua 3D-pistepilveä (dZ), jossa z-koordinaatti kertoo havainnon korkeuden maanpinnasta, käytetään koalojen otannassa, metsävaratiedon estimointiin käytettävien kaukokartoituspiirteiden laskemisessa ja automaattisessa kuvioinnissa.

ALS:n spatiaalisen kattavuuden varmistamiseksi lentolinjat lennetään aina siten, että inventointikaistat menevät osittain päällekkäin. Päällekkäisiltä kaistoilta tallennettiin vain ne kaiut, jotka oli havaittu pienemmässä keilauskulmassa. Aineiston jatkokäsittelyä varten havainnot luokiteltiin kasvillisuus-, maa- ja virhepisteiksi. Ensin kaikki havainnot luokiteltiin kasvillisuuspisteiksi, joista varmat virrehavainnot, yli 5 metriä ympäristöään alempana olevat pisteet, luokiteltiin virhepisteiksi. Maapisteet etsittiin kolmiointimenetelmällä: ensin valittiin aineiston alimmat pisteet, varmat maaosumat, 60x60 metriä laajoilta hilaruuduilta, minkä jälkeen maapisteiden valintaa jatkettiin kolmioimalla maastomalliin uusia havaintoja yksi kerrallaan. DTM:n iterointi on kuvattu tarkemmin luvussa 2.4 ja luokiteltua ALS-aineistoa on havainnollistettu kuvassa 2.

Luokiteltu 3D-pistepilvi normalisoitiin maanpintaa vasten vähentämällä jokaisen havainnon z-koordinaatista DTM:n z-koordinaatti kyseisillä x- ja y-koordinaateilla, minkä jälkeen havaintojen z-koordinaatit kertoivat havaintojen korkeuden maasta. Yli 50 metriä DTM:n yläpuolella olevat pisteet luokiteltiin virhepisteiksi, koska Suomessa puut eivät kasva niin pitkiksi. Normalisoitu dZ on esitetty kuvassa 3.



Kuva 2. Poikkileikkauskuva luokitellusta laserkeilausaineistosta. Maahavainnot on kuvattu oranssilla ja kasvillisuushavainnot valkoisella.



Kuva 3. Poikkileikkauskuva normalisoidusta laserpistepilvestä (dZ). Alue on sama kuin kuvassa 2.

2.3 Stereokuvamitattu SAR-aineisto

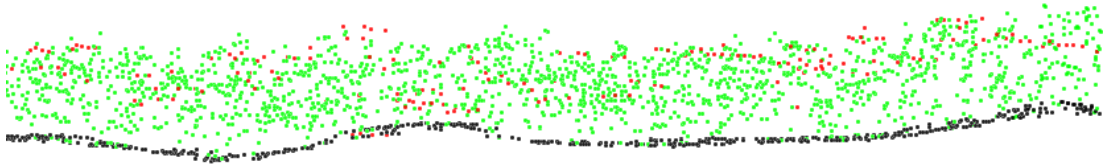
Tutkimuksessa käytettiin korkearesoluutioista saksalaisen TerraSAR-X -satelliitin ottamaa stereokuvaparia vuodelta 2009. Kyseinen satelliitti kiertää Maapalloa 514 kilometrin korkeudessa, ja se pystyy ottamaan jopa yhden metrin resoluutiolla olevia SAR-kuvia pienille, alle 50 km² laajuisille alueille (DLR 2011). Lista tutkimuksessa käytetyistä TerraSAR-X -kuvista löytyy taulukosta 1. Kuvien spatiaalinen resoluutio on 2,0–2,4 m: paras erotuskyky saadaan kohtisuorassa satelliitin kiertorataan nähden, ja huonoin satelliitin kieroradan suunnassa. Kaikki kuvat kattavat saman alueen, ja kuvat 1+3 sekä 2+4 muodostavat keskenään stereokuvaparit.

Taulukko 1. Lista käytetyistä TerraSAR-X -kuvista.

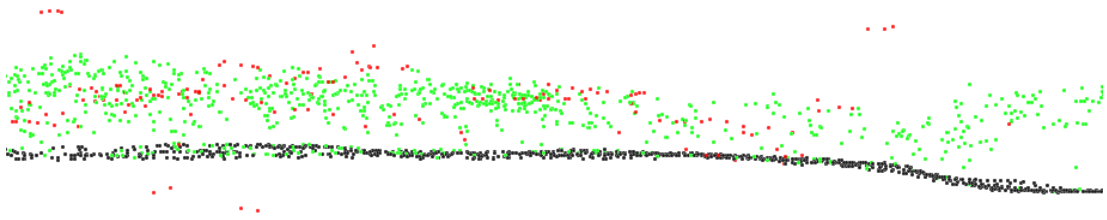
Kuvan nro.	Kuvaus-päivä	Kuvauskulma alueen keskellä	Spatiaalinen resoluutio	Säätila
1	28.4.2009	35,8 °	2,0/2,4 m	+ 19 °C, kirkasta
2	29.4.2009	36,1 °	2,0/2,4 m	+ 10 °C, enimmäkseen pilvistä
3	8.5.2009	51,7 °	2,0/2,4 m	+ 16 °C, kirkasta
4	11.5.2009	52,0 °	2,0/2,4 m	+ 10 °C, pilvistä

Geodeettisen laitoksen stereokuvamittausohjelmisto etsi automaattisesti stereokuva-pareista säteilyn intensiteettiarvojen perusteella vastinpisteitä, eli sellaisia pisteitä, jotka näkyivät molemmissa stereokuvaparin kuvissa. Ohjelmisto laski vastinpisteille 3D-sijainnin: x- ja y-koordinaatit ilmoitettiin ETRS-TM35FIN -koordinaatistossa ja z-koordinaatti kertoi pisteen korkeuden merenpinnasta. Havaintotiheys oli tutkimus-alueella keskimäärin 0,03–0,05 havaintoa/m².

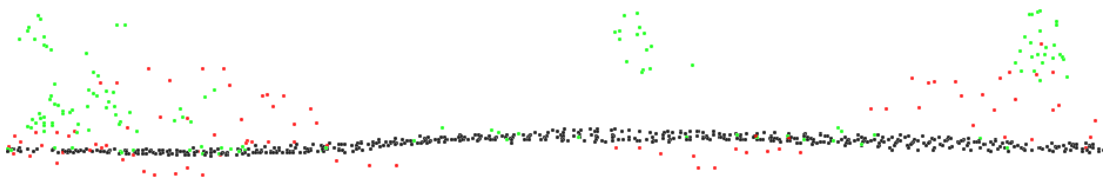
Tutkimuksessa radargrammetrian hyödyntäminen puuston kartoituksessa perustui siihen lähtökohtaan, että inventoitavalta alueelta oli saatavissa tarkka laserkeilattu DTM, koska SAR-satelliitin X-kanavan avulla ei saada riittävästi havaintoja maan-pinnassa. DTM:n avulla kasvillisuudesta löydetuille vastinpisteille saadaan tarkka korkeustieto, minkä ansiosta puuston keskipituus voidaan inventoida perinteistä 2D-kuvatulkintaa tarkemmin. Kun vastinpisteiden z-koordinaateista vähennettiin DTM:n korkeus, saatiin vastaava dZ kuin ALS-aineiston esikäsittelyssä. Havainnot, joilla oli negatiivinen tai yli 35 metrin oleva z-arvo, luokiteltiin virhepisteiksi. Hyvää stereokuvamittattua TerraSAR-X -aineistoa on verrattu ALS-aineistoon kuvassa 4, jossa stereokuvamittaus on tuottanut spatiaalisesti kattavan pistepilven, eikä selkeitä virhe-havaintoja näy. Kuvissa 5–7 on esitetty aineistossa havaittuja ongelmia, joihin olisi jatkotutkimuksissa syytä kiinnittää huomiota.



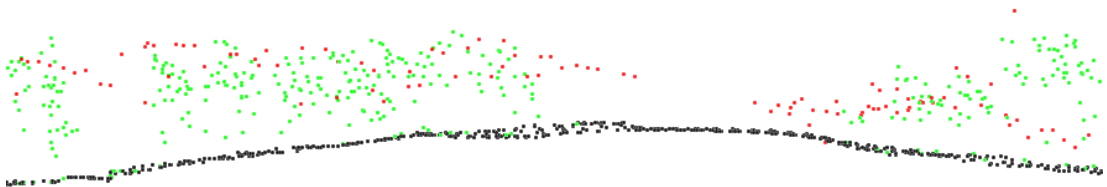
Kuva 4. Poikkileikkaukkuva tutkimuksen kaukokartoitusaineistoista: ALS-maapisteet mustalla, ALS-kasvillisuuspisteet vihreällä ja suodattamattomat SAR-havainnot punaisella. ALS-pisteistä on piirretty selkeyden vuoksi vain 50 %. Radargrammetria tuottaa varttuneessa puustossa havaintoja pääosin vain latvuston yläosasta.



Kuva 5. Radargrammetrialla tuotetun aineiston yhtenä ongelmana on se, että virheellisiä havaintoja oli tehty sekä maanpinnan alapuolelta että latvuston yläpuolelta. Aineistossa on myös isoja aukkoja, kuten poikkileikkaukkuvan oikeassa laidassa. SAR-aineiston käsittelyssä laserkeilatus DTM:n alapuolella olevat pisteet on helppo suodattaa pois, mutta latvuston yläpuolelta tulevien havaintojen poistaminen on vaikeaa. Tutkimuksessa suodatettiin pois yli 35 metrin korkeudelta tulleet havainnot.



Kuva 6. Radargrammetrialla tuotettua aineistoa huonoimmillaan, kyseessä on siemenpuuasento. Avoimilta alueilta havaintoja saadaan niukasti, ja virrehavaintojen osuus on suuri. Erityisesti metsän ja aukean rajalta näyttää usein löytyvän virheellisiä vastinpisteitä.

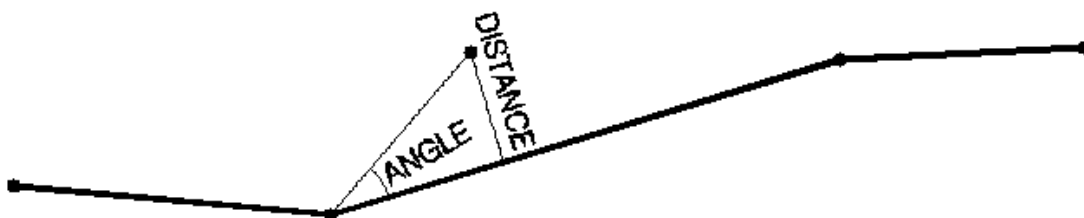


Kuva 7. Aineistoja tarkastellessa havaittiin, että virheellisesti tulkittujen vastinpisteiden vuoksi pienet latvusaukot eivät erotu radargrammetrialla. Poikkileikkauksen vasemmassa reunassa on maantie, ja mäen päällä golfkenttä. Latvusaukot erottuvat ALS:lla, mutta radargrammetrialla ne täyttyvät virrehavainnoista.

2.4 Maastomallien tuottaminen ja tarkastelu

Tutkimuksessa tehtiin erilliset maastomallit sekä laserkeilauksella että radargrammetrialla. ALS:lla tuotettua DTM:ää pidettiin referenssinä radargrammetrialla tuotetulle DTM:lle, koska ALS löytää maapisteitä tarkasti ja kattavasti. DTM:t tehtiin TerraScan-ohjelmistolla maa- ja kasvillisuusasteiksi luokiteltujen pistepilvien perusteella. SAR-aineistosta pyrittiin suodattamaan mahdollisimman hyvin pois maanpinnan alapuolelta tulleet virrehavainnot. Yksittäiset tai enintään kymmenen pisteen ryhmät, jotka olivat yli 5 metriä alempana kuin muut 30 tai 50 metrin säteellä olevat pisteet, luokiteltiin virhepisteiksi.

Maastomallit tehtiin kolmiointimenetelmällä: määriteltyjen kokoisilta hilaruuduilta (ALS 60x60 metriä ja SAR 200x200 metriä) etsittiin ensin jokaisen ruudun matalin piste, minkä jälkeen kyseisistä pisteistä muodostettiin kolmioverkko, johon lisättiin seuraavaksi matalimpia havaintoja yksi kerrallaan. Iterointia säädeltiin kuvassa 8 esitetyillä parametreilla: iteraatiokulmalla ja iteraatioetäisyydellä. Iteraatiokulma on maksimikulma kolmiointiverkkoon ehdolla olevan pisteen ja sen kolmiointiverkossa olevan projektion välillä. Iteraatioetäisyys määrittää DTM:n korkeusarvon maksimoinusun yhdellä iteraatiolla. ALS:iin perustuvassa mallissa käytettiin parametriarvoja 6° ja 1,4 metriä, ja radargrammetriaan perustuvassa mallissa parametreja 10° ja 7,0 metriä. Radargrammetrialla tuotetussa DTM:ssä sallittiin suurempi iteraatiokulma, jotta DTM noudattaisi esimerkiksi kuviorajoilla aineiston alimpia havaintoja. Myös iteraatioetäisyydelle annettiin väljä parametri, koska SAR-aineistossa pistetiheys on harva ja vierekkäisten maapisteiden välinen etäisyys suuri.



Kuva 8. Kolmiointimenetelmän parametrit. © 1998–2011 Arttu Soininen, Terrasolid.

Radargrammetrialla tuotetun DTM:n tarkkuutta tutkittiin erikseen sekä avoimilla että puustoisilla alueilla. Avoimilla alueilla tarkasteluyksikkönä käytettiin yhden metrin solukoolla olevaa hilaruudukkoa, ja mallin tuottamasta virheestä laskettiin keskivirhe sekä virheen keskihajonta, minimi ja maksimi. Metsässä tarkastelu tehtiin kuvio-
tasolla laskemalla joka kuviolle DTM:n keskivirhe, ja vertaamalla sitä ALS:lla tulkit-
tuihin kuvioittaisiin puustotunnuksiin. Tutkielmassa haluttiin selvittää, vaikuttavatko
puuston pohjapinta-ala ja keskipituus radargrammetrialla tuotetun DTM:n tarkkuu-
teen.

2.5 Metsäalueiden rajaaminen tutkimusalueelta

Pro gradussa keskityttiin metsävarojen inventointiin, joten tiet, rakennetut alueet, pellot ja vesistöt rajattiin pois tutkimusalueelta. Rajauksessa käytettiin Maanmittaus-
laitoksen maastotietokantaa, josta erilaiset maankäyttöluokat löytyvät digitoituna
joko piste-, vektori- tai polygonimuotoon.

Tiheään rakennetut alueet, teollisuusalueet, vesistöt, vesijättömaat ja pellot saatiin
maastotietokannasta polygonimuotoisina tiedostoina, jotka leikattiin pois tutkimus-
alueesta. Rakennuksille luotiin kahdeksan metriä leveä puskurivyöhyke, ja teiden
keskiviivoille tieluokasta riippuen 4–20 metriä leveä puskurivyöhyke, minkä jälkeen
rakennukset ja tiet poistettiin tutkimusalueesta puskurivyöhykkeineen. Lisäksi kaikki
alle 1,5 ha laajuiset metsäalueet sekä hyvin kapeat tai epämääräisen muotoiset raken-
nettujen alueiden, peltojen tai vesistöjen ympäröivät metsäalueet hylättiin. Rajauk-
sen jälkeen tutkimuskäyttöön jäi 1 230 ha metsää.

2.6 Maastokoealat

Koska 3D-pistepilven käyttäminen metsävarojen arvioinnissa perustuu oletukseen, että pistepilvestä laskettujen puuston pituuteen ja tiheyteen liittyvien piirteiden ja metsävaratiedon välillä on vahva riippuvuus, tarvittiin tutkimusalueelta maastokoealoja kyseisen riippuvuuden mallintamiseen. Maastokoealat paikannettiin tarkasti, ja niille laskettiin puuston tilavuus, biomassa, pohjapinta-ala, keskiläpimitta ja keskipituus. Tutkimuksen tavoitteena oli käyttää mallintamiseen noin 200 koealaa, joista osa oli mitattu syksyllä 2010 ja osa mitattiin tämän Pro gradu -työn yhteydessä tammikuussa 2013. Koealoja ei mitattu sellaisilta alueilta, joilla oli tehty hakkuita tai joihin oli kohdistunut merkittäviä metsätuhoja vuoden 2008, eli tutkimusalueelle tehdyn laserkeilauksen jälkeen.

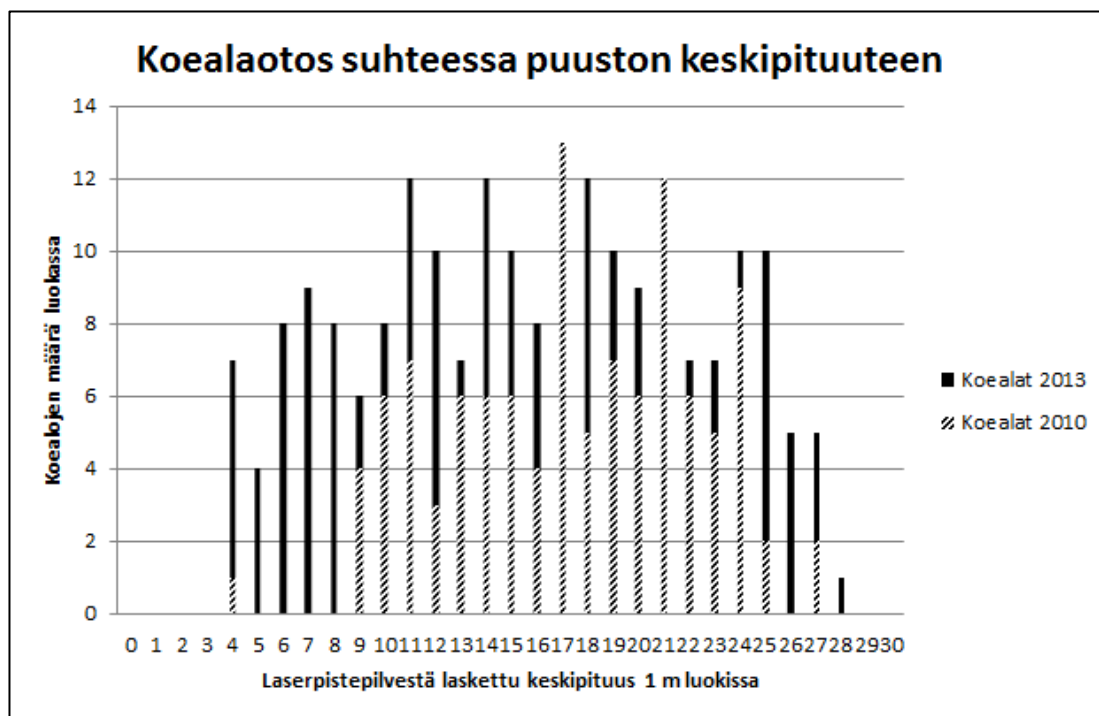
2.6.1 Aiemmin mitatut koealat ja lisäkoealojen valinta

Tutkimuksessa käytettiin Karjalaisen ym. (2012) ja Vastarannan ym. (2012a; 2013) tutkimuksia varten syksyllä 2010 mitattuja koealoja. Kyseisiä tutkimuksia varten oli mitattu 110 ympyräkoealaa, jotka oli sijoitettu ryppäittäin tutkimusalueelle. Kyseiset koealat oli mitattu pääosin varttuneista kasvatusmetsistä ja uudistuskypsistä metsistä, joten alueellisesti kattavaa biomassakartoitusta varten tarvittiin lisää referenssikoealoja erityisesti varttuneista taimikoista ja nuorista kasvatusmetsistä.

Maltamon ym. (2011) mukaan maastokoealojen pitäisi edustaa kattavasti inventoitavan alueen puustoa, joten koealojen valintaa varten ALS-aineistosta muodostettiin tutkimusalueelle pituusrasteri. Alue jaettiin 16x16 metriä laajoihin hilaruutuihin, joille laskettiin kutakin solua vastaava puuston keskipituus. Keskipituuden arvona käytettiin ALS-pistepilven korkeusjakauman 85. persentiiliä, jotta esimerkiksi yksittäiset isot puut tai linnuista heijastuneet kaiut eivät vääristäisi pituusarviota.

Tutkimusalueelle päätettiin sijoittaa 100 lisäkoealaa, joiden valintaa varten alueelle generoitiin satunnaisesti 1000 koealaa. Mitattavat koealat valittiin kyseisestä joukosta manuaalisesti siten, että koealaotannon tavoitteena oli saada pituusrasterin suhteen

mahdollisimman tasainen otos, sekä sijoittaa koealat maastotöiden nopeuttamiseksi muutamien koealojen ryppäisiin. Maastokoealoja ei ole mitattu sellaisilta alueilta, joilla puuston keskipituus on alle 4 metriä, koska kyseisillä alueilla puuston biomassa on varsin mitätön. Koealaotannon täydentämistä on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 9. Maastokoealojen jakauma suhteessa laserpistepilvestä laskettuun puuston keskipituuteen (85. persentiili). Koealaotannon tavoitteena oli saada kattava koealaotos suhteessa tutkimusalueella olevaan puuston piteuden vaihteluun. Kuvasta näkyy, kuinka koealaotosta on täydennetty tammikuussa 2013.

Taulukko 2. Yhteenvedo mitatuista referenssikoealoista.

Mittausajankohta	Koealat (kpl)	Mitatut puut (kpl)	Pituuskoepuut (kpl)	Mittaaja
Syksy 2010	110	2114	456	Ville Kankare
Tammikuu 2013	97	2423	490	Mikko Niemi

2.6.2 Koealamittaukset

Jokaisella koealalla tarkastettiin, ettei metsässä ole lähivuosina tehty merkittäviä metsänhoitotoimenpiteitä, eikä alueella ole ollut huomattavia metsätuhoja. Jos koeala osui lähelle kuviorajaa, sen keskipistettä siirrettiin joko 10 tai 20 metriä kohtisuoraan kuviorajasta pois päin, jotta SAR-aineistosta voitaisiin tehdä piirteiden laskenta mitattuja koealoja suuremmille alueille. Koska heti maastotyövaiheen alussa havaittiin, että hylättävien koealojen määrä tulee olemaan suuri, kolmen maastotyöpäivän jälkeen loppuja koealaryppäitä täydennettiin yhteensä 12 koealalla. Metsissä tapahtuneiden muutosten vuoksi hylättiin yhteensä 15 koealaa, joten lisäkoealoja mitattiin tammikuussa 2013 yhteensä 97 kappaletta. Näin ollen tutkimuksessa oli käytössä yhteensä 207 referenssikoealaa, joista on koottu lyhyt yhteenveto taulukkoon 2.

Maastokoealojen sijainti etsittiin TrimbleGeoXT 2008 -GPS:llä (Global Positioning System), jolla myös tallennettiin jokaisen koealan keskipisteen koordinaatit. Hyvän paikannustarkkuuden saavuttamiseksi jokaiselta koealalta tallennettiin sijaintitietoja vähintään 5 minuuttia, ja havainnoille tehtiin differentiaalikorjaus Helsingin lähellä sijaitsevilta VRS-tukiasemilta (Virtual Reference Station) saatujen tietojen avulla.

Ympyräkoealoilta, joiden säde oli 8,0 metriä, määritettiin jokaisesta rinnankorkeusläpimitaltaan vähintään 5,0 cm paksusta puusta puulaji, ja mitattiin rinnankorkeusläpimitta. Lisäksi pituusmallin tekemistä varten joka viidennestä puusta mitattiin Haglöf Vertex -kaltevuusmittarilla puun pituus.

2.6.3 Metsävaratiedon laskenta koealoille

Pituuskoepuiden pituus- ja läpimittahavaintojen perusteella luotiin kaikkien puiden pituuksien ennustamista varten Näslundin (1936) pituuskäyrään perustuva malli puun pituudesta läpimitan funktiona. Lisäksi mallin selittävänä muuttujana käytettiin kahteen luokkaan jaettua kasvupaikkatietoa: rehevät (VT+) ja karut (CT ja kitumaat). Koska koealat oli mitattu hyvin erilaisista metsistä, pituusmallista tehtiin koealakohtaisen satunnaisvaihtelun sisältämä sekamalli, jossa koealojen pituushavainnot kalibroivat pituusmallin tasoa erikseen joka koealalle. Selittävästä muuttujista puun

läpimitta ja koealan kasvupaikka kuuluivat mallin systemaattiseen osaan ja koealan tunnus mallin satunnaisosaan. Kaavassa 1 on esitetty mallin linearisoitu muoto, jossa puun i pituutta h (dm) koealalla k on mallinnettu läpimitan d (mm), kasvupaikan sc ja koealakohtaisen satunnaisvaihtelun a suhteen.

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{h_{ki}}{10} - 1,3}} = b_0 + b_1 * \frac{1}{d_{ki}} + b_2 * sc_k + a_k + e_{ki} \quad (1)$$

Kun pituusmalli oli ratkaistu linearisoidussa muodossa, se palautettiin takaisin epälineaariseen muotoon, ja muunnoksen aiheuttama harha korjattiin. Pituusmalli mallinsi pituuskoepuiden pituudet 2,17 metrin RMSE:llä. Suhteellinen RMSE pituusennusteille oli 14,9 %.

Yksittäisten puiden tilavuudet laskettiin Laasasenahon (1982) kehittämällä eri puulajien tilavuusmalleilla, joissa selittävinä muuttujina käytettiin puun rinnankorkeusläpimittaa ja puulle mallinnettua pituutta. Yksittäisten puiden biomassat laskettiin Repolan (2008; 2009) kehittämällä biomassamalleilla. Koealan puuston pohjapinta-ala, tilavuus ja biomassa saatiin laskemalla yhteen koealalle osuneiden yksittäisten puiden kyseiset tunnuksat. Koealan puuston keskiläpimitta ja keskipituus laskettiin yksittäisten puiden läpimittojen ja mallinnettujen pituuksien pohjapinta-alalla painotettuina keskiarvoina.

2.6.4 Eri ajankohdilta olevat aineistot

Yksi tutkimuksen keskeisistä ongelmista ja virhelähteistä oli se, että aineistoja oli hankittu eri vuosina. ALS oli tehty keväällä 2008 ja SAR-stereokuvaus keväällä 2009. Ensimmäinen maastomittausurakka oli tehty syksyllä 2010 ja toinen tammi-kuussa 2013. Boreaalisisissa havumetsissä kasvu on kuitenkin niukkaa, valtakunnan metsien 10. inventoinnin mukaan Suomen etelärannikolla metsien tilavuuskasvu on keskimäärin 5,4 m³/ha/vuosi (Metsätilastollinen vuosikirja 2011), joten aineistojen eri hankinta-ajankohdat eivät merkittävästi vaikuta tuloksiin. Vuonna 2013 mitatut

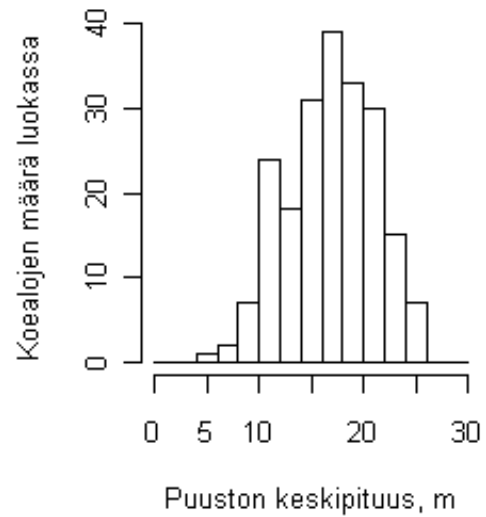
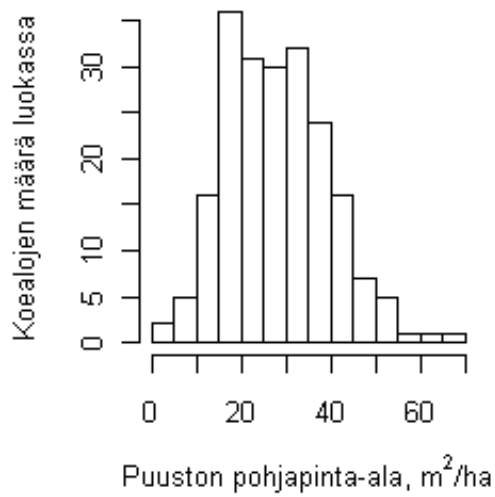
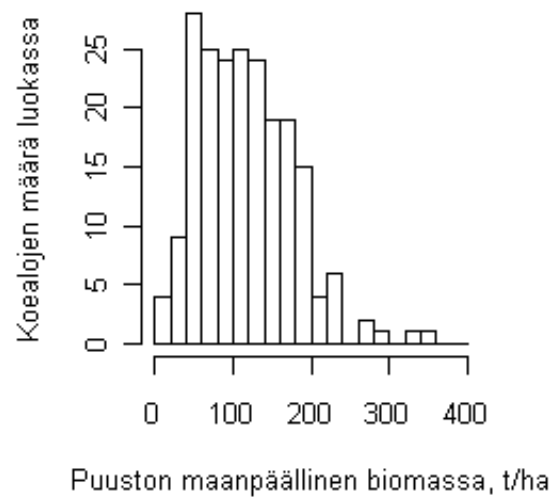
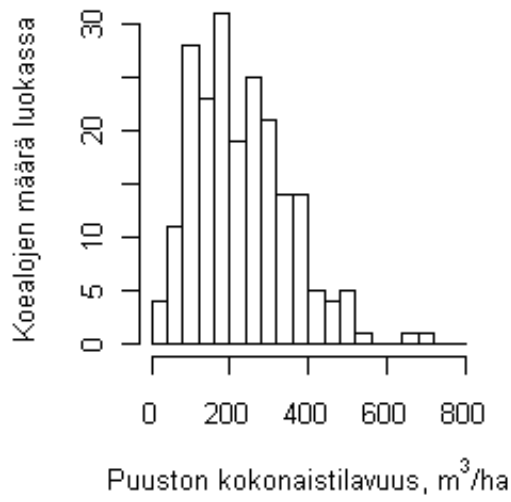
koealat mallinnettiin kaksi kasvukautta taaksepäin syksyn 2010 tilanteeseen, jotta kaikki maastokoealat edustaisivat saman ajankohdan tietoa, mutta muut ajalliset poikkeamat aineistojen välillä sallittiin.

Vuonna 2013 mitattujen koealojen kasvujen ennustamisessa käytettiin maastossa mitatun keskipituuden ja ALS:lla tulkitun keskipituuden (85. persentiili) erotusta, koska näiden tunnusten välillä oli vahva korrelaatio (0,90). Vuonna 2010 mitattujen koealojen perusteella todettiin ALS:n 85. persentiilin aliarvioivan puuston keskipituutta keskimäärin 0,45 metriä. Kasvumallinnus tehtiin niille vuonna 2013 mitatuille koealoille, joiden kasvupaikka oli ravinteisuudeltaan vähintään kuivahko kangas (VT), ja joiden maastossa mitatun keskipituuden ja ALS:n perusteella tulkitun keskipituuden välinen erotus oli vähintään edellä mainitun ALS:n aliarvion suuruinen.

Puiden vuotuinen koealakohtainen pituuskasvu laskettiin edellä mainitun erotuksen avulla ALS:n keskimääräinen aliarvio huomioiden, ja pituuskasvu oletettiin samaksi koealan joka puulle. Kasvumallinnuksen aiheuttamien virheiden minimoimiseksi pituuskasvun maksimitasona käytettiin Nyysösen ja Mielikäisen (1978) Suomen etelärannikolle tasokorjattua tuoreen kankaan kuusikon pituuskasvumallia, jossa selittävinä muuttujina käytettiin yksittäisen puun läpimittaa ja pituutta sekä koealan puuston kokonaistilavuutta. Puiden läpimitan kasvu ennustettiin koealakohtaisten läpimitta-pituusmallien avulla. Yhteenvedoa koealojen puustotunnuksista on koottu taulukkoon 3 ja kuvaan 10.

Taulukko 3. Tilastollisia tunnuslukuja koealojen välisestä vaihtelusta.

	BA, m²/ha	Dg, cm	Hg, m	AGB, t/ha	VOL, m³/ha
minimi	2,1	8,1	5,0	3,9	6,7
keskiarvo	27,9	24,2	16,9	116,5	231,7
maksimi	69,3	42,0	25,4	347,1	712,9
keskihajonta	11,5	7,2	4,1	59,7	123,2



Kuva 10. Histogrammit puuston kokonaistilavuuden, maanpäällisen biomassan, pohjapinta-alan ja keskipituuden välisestä vaihtelusta koeala-aineistossa.

2.7 Koealakohtaisen metsävaratiedon estimointi

Tutkimuksessa maastokoealoille sekä mitattiin että kaukokartoitusaineistojen perusteella estimointiin puuston kokonaistilavuus (m^3/ha), biomassa (t/ha), pohjapinta-ala (m^2/ha) ja keskipituus (m). Inventoinnin lähtökohtana oletettiin, että maastossa mitattujen tunnusten ja koealoille irrotettujen erilaisten kaukokartoituspiirteiden välillä ilmenee mallinnettavissa oleva riippuvuus. Työssä tehtiin itsenäiset lähimmän naapurin menetelmään perustuvat mallit sekä ALS- että SAR-aineistojen perusteella, jotta menetelmien tarkkuutta voitiin verrata.

Tutkimuksessa metsävaratieto estimointiin ei-parametrisella k-MSN -menetelmällä. Kyseessä on lähimmän naapurin menetelmä, jossa referenssikoealojen joukosta etsitään k kappaletta lähimpiä naapureita, eli sellaisia koealoja, joiden kaukokartoituspiirteet ovat lähimpänä arvioitavan kohteen kaukokartoituspiirteitä. MSN-menetelmässä kaukokartoituspiirteiden samankaltaisuus, eli lähimpien naapurien valinta, määräytyy kanonisen korrelaation ja Mahalanobisin etäisyyden perusteella (Moeur & Stage 1995). Tutkimuksessa jokaiselle inventointiyksikölle laskettiin k kappaletta lähimpiä naapureita (k-MSN), ja metsävaratieto estimointiin lähimpien naapurien puustotunnusten keskiarvoina (Packalén & Maltamo 2007).

2.7.1 Kaukokartoituspiirteiden irrotus maastokoealoille

Molemmista kaukokartoitusaineistoista irrotettiin referenssikoealoille itsenäiset ALS- ja SAR-piirteet Arbonautin kehittämällä ja ylläpitämällä ArboLiDAR-työkaluilla. ALS-piirteet irrotettiin maastomittauksia vastaaville, säteeltään 8 metrin laajuisille ympyräkoealoille. SAR-piirteet jouduttiin sen sijaan irrottamaan säteeltään 20 metrin ympyräkoealoille, jotta piirteiden laskentaan saatiin riittävästi havaintoja per koeala. Edellä mainittu toimenpide voitiin tehdä, koska maastokoealat oli sijoitettu metsikkökuvioiden keskelle, ja jokaisella koealalla keskipistettä ympäröivä 20 metriä leveä vyöhyke oli silmämääräisesti todettu puustoltaan yhteneväksi. Niille koealoille, joille osui alle kymmenen havaintoa, ei laskettu piirteitä. ALS-piirteet

voitiin laskea kaikille 207 koealalle, mutta SAR-piirteitä ei saatu heikon havaintotiheyden takia laskettua 15 koealalle.

Piirteiden laskenta perustui koealoille osuneiden havaintojen korkeusjakaumaan, sekä ALS:n tapauksessa tietoon kaiun laadusta: ensimmäinen, keskimäinen, viimeinen tai ainoa kaiku. Næssetin (2002) tutkimuksen mukaisesti koealoille laskettiin kasvillisuushavaintojen perusteella keski- ja maksimikorkeus sekä 0., 10., 20., ..., 80. ja 90. persentiili, eli korkeudet, joiden alapuolelle jää kyseinen prosenttimäärä havainnoista. Puuston tiheyttä Næsset (2002) pyrki selittämään sellaisilla tunnuksilla, jotka kertoivat jonkin määritellyn korkeuden yläpuolelta tulleiden havaintojen määrän suhteessa kaikkiin havaintoihin. Edellä mainittuja tunnuksia laskettiin erilaisilla maa- ja kasvillisuuspisteiden leikkauskorkeuksilla, sekä ALS:n eri kaikutyypeillä. Lisäksi testattiin kaikkia Arbonautin laserkeilausprojekteja varten kehitettyjä muuttujia, joista tämän opinnäytetyön malleihin valitut muuttujat löytyvät selityksineen liitteistä 1 ja 2. Yhteensä ALS-aineistosta irrotettiin 182 piirrettä ja SAR-aineistosta 130 piirrettä.

2.7.2 Piirrevalinta ja ristiinvalidointi

ALS- ja SAR-mallit muodostettiin minimoimalla referenssikoealojen kokonaisuuden estimaattien RMSE:tä. Alkuperäistä piirteiden lukumäärää oli karsittava huomattavasti, joten jokaiselle piirteelle tehtiin kolme riippuvuuskuvaajaa, joissa piirteen arvoja selitettiin koealan puuston tilavuudella, pohjapinta-alalla ja keskipituudella. Riippuvuuskuvaajien perusteella malleista karsittiin pois sellaiset piirteet, jotka eivät millään tavalla selittäneet puustotunnusten vaihtelua. Jos puustotunnusten ja kaukokartoituspiirteiden välillä vaikutti olevan epälineaarinen riippuvuus, piirteelle tehtiin erilaisia muunnoksia (neliö, neliöjuuri, logaritmi), ja niiden toimivuutta mallin selittävinä muuttujina tarkasteltiin riippuvuuskuvioiden avulla.

Mallien lopullinen muuttujien valinta suoritettiin manuaalisesti testaamalla erilaisia selittävien muuttujien ja niiden muunnosten yhdistelmiä. Mallien hyvyttä testattiin leave-one-out -ristiinvalidoinnilla, jolla estimoitiin koealakohtainen metsävaratieto jokaiselle koealalle siten, että kyseinen koeala ei voinut tulla valituksi lähimmäksi

naapuriksi. Inventoinnin tarkkuutta tarkasteltiin estimaattien harhan (kaavat 2 & 3) sekä RMSE:n (kaavat 4 & 5) perusteella. Piirrevalinta lopetettiin ja mallit hyväksyttiin, kun puuston tilavuuden RMSE:tä ei enää saatu parannettua. ALS-malliin valitut selittävät muuttuvat löytyvät liitteestä 1 ja SAR-malliin valitut muuttujat liitteestä 2.

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

$$harha\% = 100 * \frac{harha}{\bar{y}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$RMSE\% = 100 * \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (5)$$

y_i = muuttujan y mitattu arvo koealalla i

\hat{y}_i = muuttujan y estimoitu arvo koealalla i

\bar{y} = muuttujan y mitattujen arvojen keskiarvo

n = koealojen lukumäärä

2.8 Kuvioittaisen metsävaratiedon estimointi

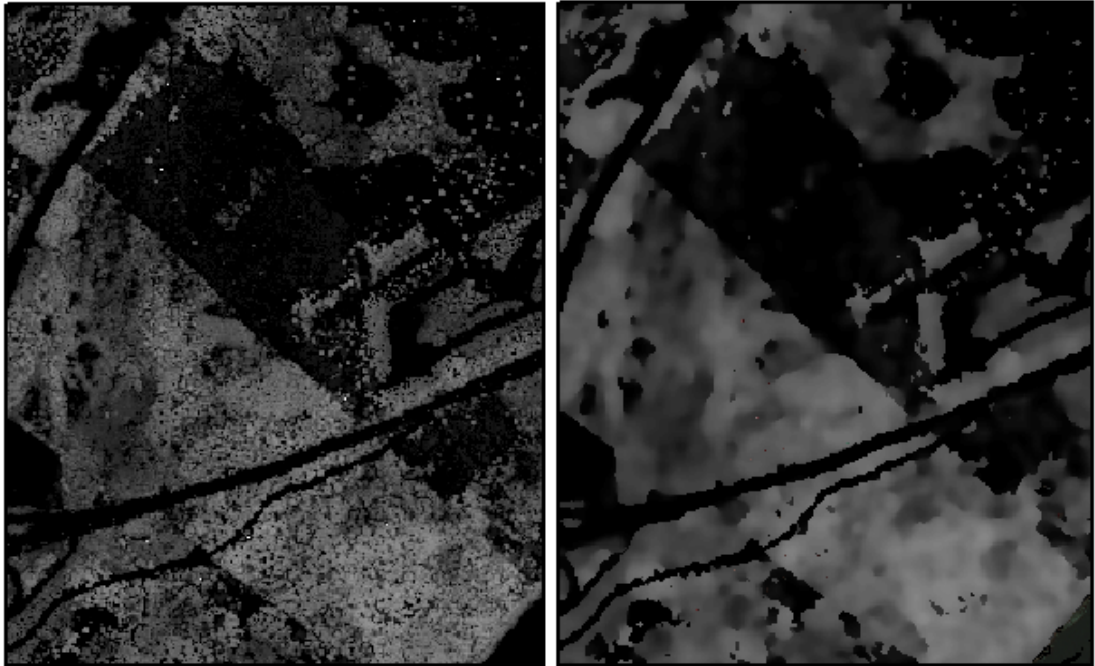
Suomalaisessa metsäsuunnittelussa tärkein metsien inventointi- ja käsittely-yksikkö on toistaiseksi ollut puustoltaan ja maaperältään mahdollisimman homogeeninen metsikkökuvio. Metsätilat jaetaan kuvioihin siten, että hoitotoimenpiteet ja hakkuut voidaan toteuttaa kuvioittain. Käytännön syistä, kuten koneiden siirtokustannusten vuoksi, kuvioiden minimikokona on Suomessa pidetty noin puolta hehtaaria. Perinteisesti kuviointi on Suomessa tehty manuaalisesti peruskartan ja ilmakuvan avulla, ja kuvioiden metsävaratieto on kerätty maastotyönä. Nykyään on kuitenkin olemassa 3D-tietoon perustuvia automaattisia kuviointimenetelmiä, ja laserkeilausaineistosta voidaan ABA:lla tulkita kuvioiden puustotunnukset. Tässä tutkimuksessa vastaavaa aluepohjaista lähestymistapaa sovellettiin myös stereomitatulle 3D-SAR-aineistolle.

2.8.1 Automaattinen kuviointi

Tässä opinnäytetyössä alueelle tehtiin Arbonautin kehittämällä kuviointialgoritmeilla ALS-aineistoon perustuva automaattinen segmentointi, jossa hyödynnettiin aluepohjaisesti tulkittuja puuston pituutta ja tiheyttä. Kuviokoon sallittiin olevan enintään 10 ha ja vähintään 1 256 m², joka vastasi SAR-piirteiden irrotuksessa käytettyjen referenssikoealojen pinta-alaa.

Kuviointi perustui kaksikanavaisen puuston pituus-tiheysrasteriin, jonka pikselikoko oli 4 metriä. Puuston pituutena käytettiin ALS-pistepilven 85. persentiiliä, ja tiheyttä kuvattiin yli 2 metrin korkeudelta tulleiden kasvillisuushavaintojen suhteella kaikkiin havaintoihin.

Sekä pituus- että tiheysrasterille tehtiin kaksi suodatusta. Ensin ajettiin mediaanisuodatus, joka laskee jokaisen pikselin 3x3 -naapurustosta mediaanin arvon, ja tallensi tuloksen uuden rasterin kyseisen pikselin arvoksi. Mediaanisuodatuksella saatiin poistettua rastereista kohinaa säilyttäen kuviorajat, koska mediaanin laskeminen ei keskiarvoista kuviorajoille osuvien pikseleiden arvoja. Mediaanisuodatuksen jälkeen

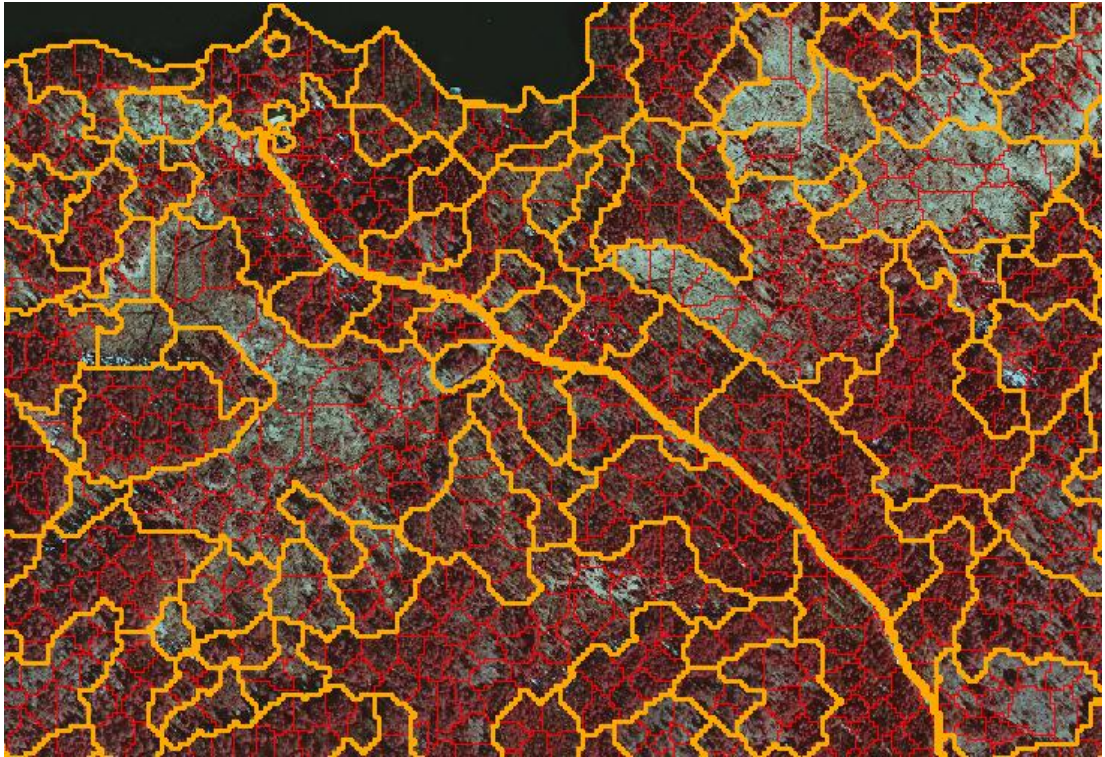


Kuva 11. Vasemmalla alkuperäinen 4 metrin pikselikokoalla oleva pituusrasteri ja oikealla segmentoinnissa käytetty, suodatettu pituusrasteri.

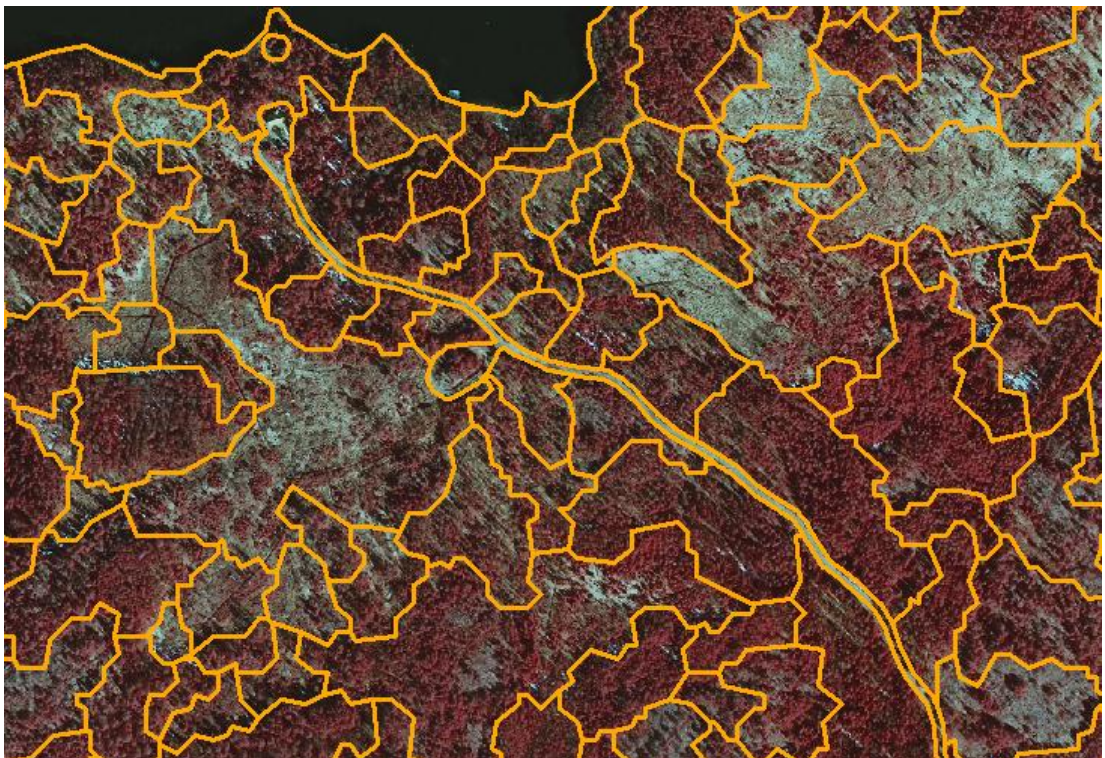
tehtiin mean-shift -suodatus, jossa pikseleille tallennettiin niiden naapuruston keskiarvo, mikäli se poikkesi pikselin alkuperäisestä arvosta alle ohjelmiston käyttäjän määrittämän parametriarvon (subjektiivisen testauksen jälkeen opinnäytetyöhön valitut parametrit: pituusrasteri 8, tiheysrasteri 0,2). Mean-shift -suodatuksella voidaan muodostaa yhtenäisiä alueita, mutta säilyttää selkeät rajat (Comaniciu & Meer 2002). Alkuperäinen ja suodatettu pituusrasteri on esitetty kuvassa 11. Suodatuksen jälkeen alueelle on selkeästi muodostunut yhtenäisiä alueita, mutta esimerkiksi varttuneen metsän ja aukon raja on edelleen selkeä.

Kuviointi aloitettiin muodostamalla alueelle pieniä mikrokuvia Leppäsen ym. (2008) esittämällä lähestymistavalla ("limited iterative region growing algorithm"): ensin algoritmi luo alueelle suuren joukon siemenpisteitä ja segmentoi niiden ympärillä olevat likimain homogeeniset alueet samaan segmenttiin. Segmentoitumattomat pikselit liitetään sen jälkeen löysemmillä ehdoilla pituus- ja tiheysarvojen mukaan samankaltaisimpaan mikrokuvioon. Kuvassa 12 punaisella piirretyt segmentit kuvaavat siemenpisteiden ympärille muodostettuja mikrokuvia.

Mikrokuviot ovat kuitenkin pieniä ja naapurikuviot saattavat olla keskenään hyvin samankaltaisia, joten on tarkoituksenmukaista yhdistellä mikrokuvia suuremmiksi kuvioiksi. Mikrokuvioille laskettiin pituus-tiheysrasterin molempien kanavien keskiarvot ja keskihajonnat. Mikrokuvia yhdisteltiin toisiinsa, mikäli edellä mainitut arvot poikkesivat naapurikuvioilla alle ohjelmiston käyttäjän kokeellisesti määrittämien raja-arvojen. Kuvioiden yhdistäminen toteutettiin kahdessa vaiheessa siten, että jälkimmäisessä vaiheessa pienten kuvioiden sallittiin yhdistyvän ensimmäistä vaihetta löysemmin ehdoin. Lopuksi alle $1\ 256\ \text{m}^2$ kokoiset kuviot pakotettiin liittymään naapurikuvioon pisimmän yhteisen kuviorajan perusteella. Yhdistetyt mikrokuviot näkyvät keltaisella kuvassa 12. Lopuksi kuviorajat vielä sievennettiin (kuva 13).



Kuva 12. Mikrokuviot rajattu punaisella, ja niistä yhdistetyt kuviot keltaisella.

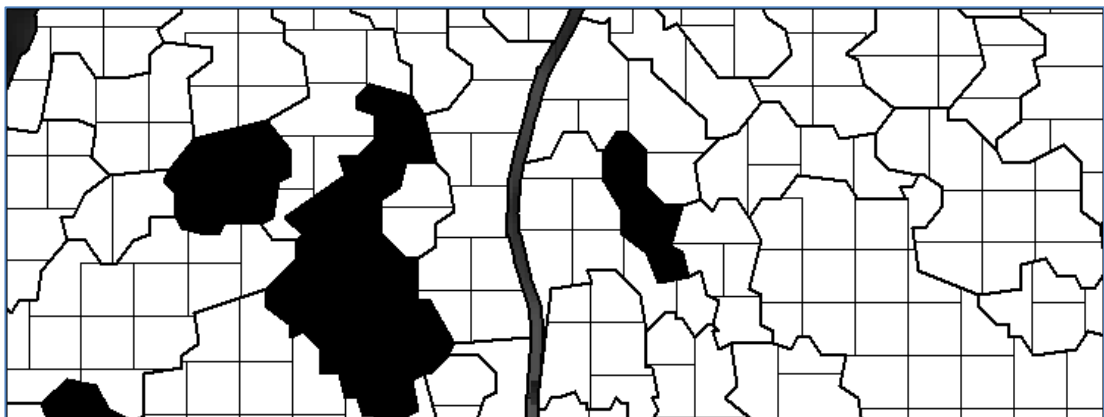


Kuva 13. Lopullinen kuviointi, jossa kuviorajoja on sievennetty.

Automaattisen kuvioinnin haasteena on kuvioinnin voimakas riippuvuus käyttäjän asettamista parametreista, jotka ovat hyvin tiedontarve- ja aluekohtaisia. Leppänen ym. (2008) vertasivat ALS-aineistoon pohjautuvaa kuviointia metsäammattilaisen ilmakuvan perusteella tekemään kuviointiin, ja totesivat ALS-kuvioinnin erottavan puuston kokonaistilavuuden osalta toisistaan poikkeavat metsiköt erilleen likimain yhtä hyvin kuin metsäsuunnittelija. Jos kuvioinnissa halutaan huomioida tilavuuden lisäksi myös puulajisuhteiden vaihtelu, automaattiseen segmentointiin on syytä lisätä kolmanneksi kanavaksi ilmakuvan lähi-infrapunakanavan sävyarvo, jolloin puuston puulajeittainen tilavuus vaihteli kuvioiden sisällä Leppäsen ym. mukaan vähemmän kuin ammattilaisen ilmakuvan perusteella tekemässä kuvioinnissa.

2.8.2 Metsävaratiedon laskenta kuvioille

Kuvioittaisen metsävaratiedon laskentaa varten kuviot jaettiin ALS-tulkinnassa 14x14 metrin ja SAR-tulkinnassa 35x35 metrin suuruisiksi hilaruudukoiksi, joille metsävaratieto ennustettiin lähimmän naapurin menetelmää käyttäen. Kyseiset neliöt vastasivat pinta-alaltaan tutkimuksessa käytettyjen referenssikoealojen pinta-alaa. Kuvioiden reunoilla ne ruudut, joiden pinta-ala oli alle puolet täydestä hilaruudusta, yhdistettiin naapuriruutuihin pisimmän yhteisen rajan perusteella. Ne kuviot, joiden sisällä yli puolet ruuduista sai ALS-pistepilven 85. persentiilin arvoksi alle 4 metriä, hylättiin laskennasta, koska referenssikoealoja ei ollut vastaavista kohteista. Hilaruudukkoa kuviotason puustotulkinnassa on havainnollistettu kuvassa 14.



Kuva 14. Kuvioittaisen puustotulkinnan inventointiyksiköt – kuvioiden sisälle luotu hila.

Sekä ALS- että SAR-puustotulkinnassa käytettäville hilaruuduille irrotettiin kyseisiä menetelmiä vastaavat, k-MSN -malleihin valitut, liitteissä 1 ja 2 raportoidut piirteet, joiden perusteella jokaiselle ruudulle haettiin referenssikoealojen joukosta 5 lähintä naapuria. Jokaisen hilaruudun metsävaratieto laskettiin sen 5 lähimmän naapurin puustotunnusten keskiarvoina. Kuvioiden puustotunnukset laskettiin kuviolle osuvien hilaruutujen puustotunnusten keskiarvoina. ALS-inventointia pidettiin referenssinä tarkasteltaessa radargrammetrialla tuotettuja kuvioittaisia estimaatteja.

2.9 Monilähteinen valtakunnan metsien inventointi

Vertailuaineistona radargrammetrian tuottamille kuvioittaisille tilavuus- ja biomassastimaateille käytettiin Landsat TM -satelliittikuvia hyödyntävää monilähteistä VMI:tä (MVMI). MVMI:ssä metsävarat arvioidaan harvan koelaverkoston väliin jääville alueille k-NN -lähimmän naapurin menetelmää käyttäen. Satelliittikuvien lisäksi inventoinnissa käytetään numeerisia peruskarttoja muun muassa metsätalouden erottamisessa, sekä numeerista korkeusmallia maanpinnan muotojen aiheuttamien virhetulkintojen välttämiseksi. Metsäntutkimuslaitoksen vetämän hankkeen lopputuotteena saadaan paikkaan sidottua tietoa yli 40 erilaisesta puuston määrästä ja rakennetta kuvaavasta tunnuksesta. (Metsäntutkimuslaitos 2010)

Opinnäytetyössä käytettiin Metsäntutkimuslaitoksen avoimen aineiston tiedostopalvelusta saatavia teemakarttoja vuoden 2009 puuston kokonaistilavuudesta ja biomassasta. Aineisto oli ladattavissa rasterimuotoisena 20 metrin pikselikoossa olevana teemakarttana. Tässä tutkimuksessa MVMI:n kuvioittainen VOL ja AGB laskettiin keskiarvona niiden pikseleiden arvoista, joiden pinta-alasta vähintään puolet kuului laskettavaan kuvioon.

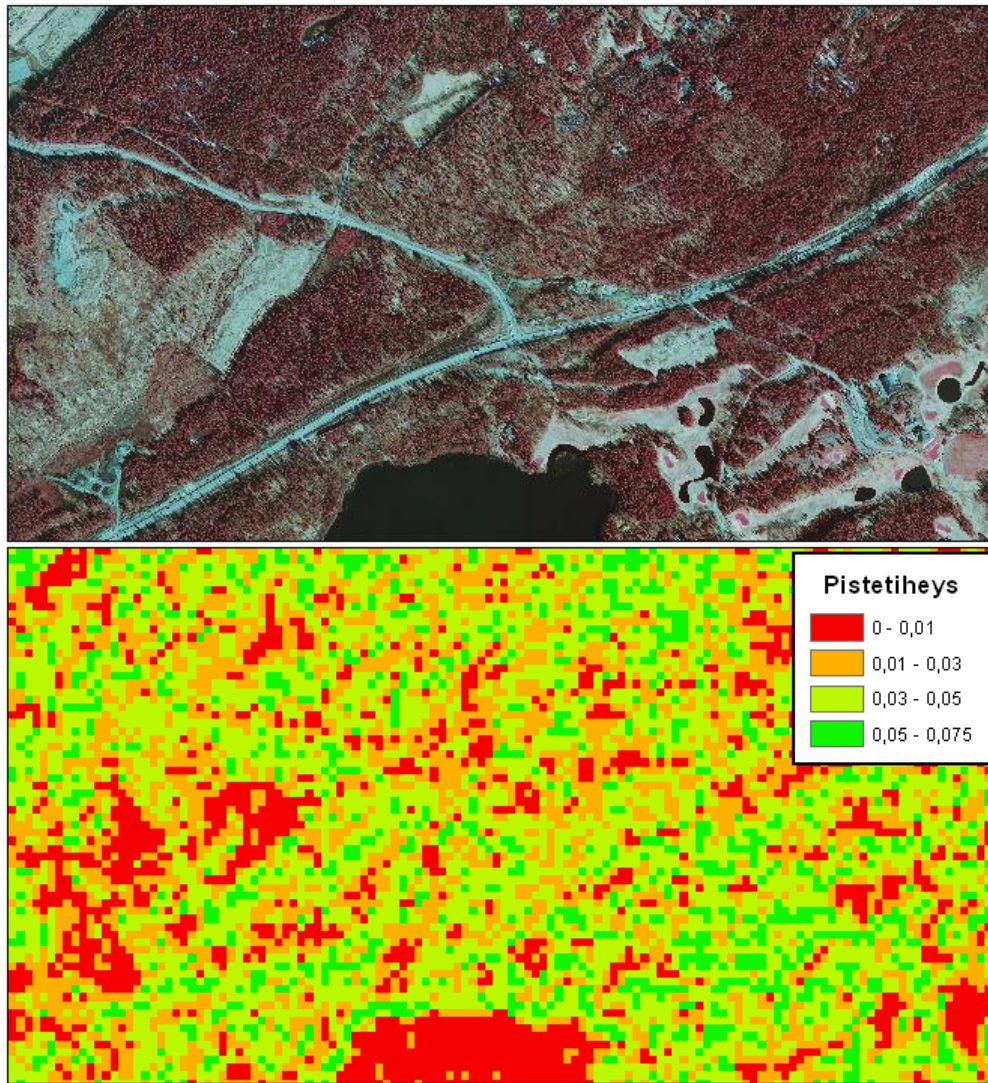
3. TULOKSET

3.1 SAR-radargrammetrialla tuotetun maastomallin tarkkuus

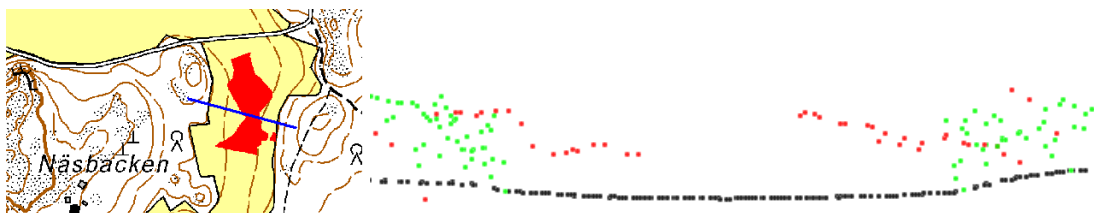
Radargrammetrialla tuotetun DTM:n ongelmia olivat aineiston heikko pistetiheys erityisesti avoimilla alueilla, maahavaintojen puuttuminen puustoisilla alueilla sekä maanpinnan alapuolelta tulleet virheelliset havainnot. Pistetiheydessä oli voimakasta alueellista vaihtelua, mikä voidaan nähdä verrattaessa samalta alueelta olevaa ilmakuvaa ja aineiston pistetiheyttä kuvaavaa teemakarttaa (kuva 15). Nuorissa taimikoissa, pelloilla ja muilla avoimilla alueilla aineiston pistetiheyden havaittiin olevan erittäin alhainen, jopa alle $0,01$ havaintoa/m². Metsissä havaintotiheys on pääosin $0,03$ – $0,05$ havaintoa/m².

Radargrammetriaan perustuva DTM havaittiin avoimilla alueilla erittäin huonoksi. Tässä tutkimuksessa avoimiksi alueiksi luokiteltiin pellot ja avoimet metsämaat, eli aukeaksi tai siemenpuuasentoon hakatut metsät sekä alle metrin pituiset taimikot. Keskimäärin radargrammetriaan perustuva DTM yliarvioi laserkeilaukseen perustuvaa DTM:ää $5,6$ metrillä. Virheen vaihteluväli oli $-16,8$ – $27,0$ metriä ja keskihajonta $12,1$ metriä, eli radargrammetria ei vaikuta käyttökelpoiselta DTM:n laadinnassa. Kuvassa 16 on havainnollistettu tyypillistä aineistossa havaittua ongelmaa.

Metsässä DTM:n ongelmana on havaintojen puuttuminen maanpinnan tasalta, koska X-kanava ei läpäise latvustoa juuri lainkaan. DTM:n tarkastelu tehtiin kuviotasolla niille kuvioille, joilla ALS-pistepilven 85. persentiili on keskimäärin yli 4 metriä. Kuvion pinta-alalla painotettu DTM:n keskivirhe oli $6,6$ metriä, virheen keskihajonta $3,7$ metriä ja virheen vaihteluväli $-5,0$ – $21,3$ metriä. Kuvissa 17 ja 18 on havainnollistettu, että DTM:n virheellä on selvä riippuvuus puuston pituuteen ja tiheyteen. DTM näyttäisi asettuvan metsässä noin 10 metriä puiden keskipituuden alapuolelle.

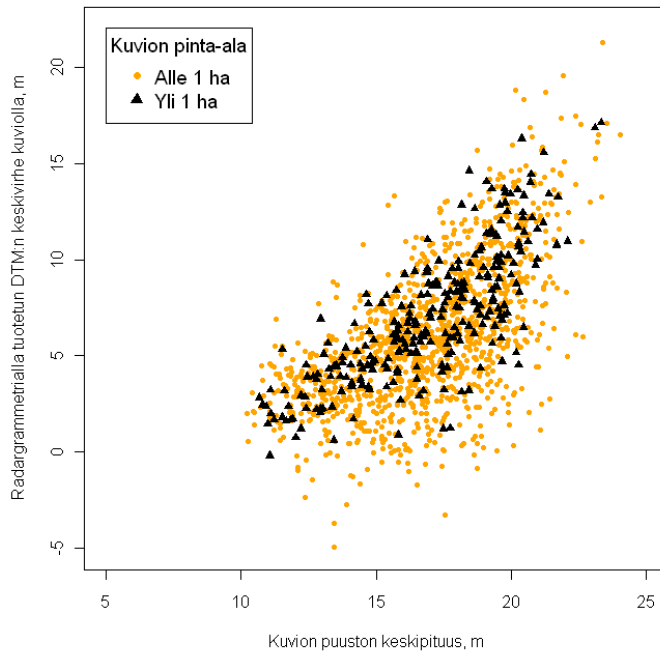


Kuva 15. Ylhäällä ortoilmakuva ja alhaalla aineiston pistetiheyttä (havaintoja/m²) kuvaava teemakartta samalta alueelta. Esimerkiksi kuvien vasemmassa reunassa olevalta aukolta ja kuvien oikeassa alakulmassa olevilta golfkentiltä saadaan huonosti havaintoja. Parhaiten havaintoja saadaan varttuneista metsistä.



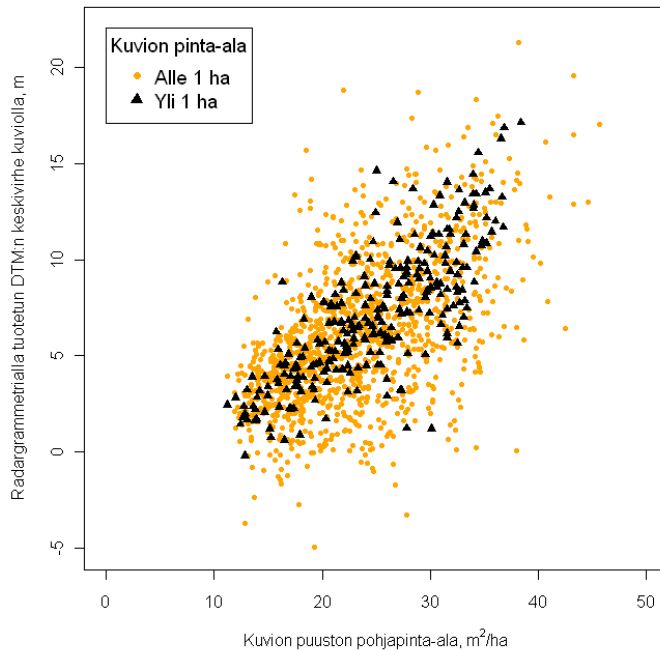
Kuva 16. Tyypillinen ongelmakohde radargrammetriaan perustuvalle kaukokartoitukselle. Vasemmalla olevassa peruskartassa näkyy punaisella värjätty alue, jossa DTM:n virhe on yli 20 metriä, eli mäkien välissä oleva peltonotkelma. Oikealla olevassa pistepilvessä, joka on poikkileikkaus peruskartan sinisen viivan kohdalta, näkyy virheen syy: virheellisesti tulkitut vastinpisteet metsän ja pellon rajalla. Radargrammetrialla tuotetut pisteet ovat punaisia ja laserkeilauksella tuotetut pisteet vihreitä ja mustia.

Radargrammetrialla tuotettu DTM suhteessa puuston keskipituuteen



Kuva 17. Puuston keskipituudella vaikuttaa olevan selkeä korrelaatio radargrammetrialla tuotetun DTM:n virheen kanssa. Metsässä DTM, eli radargrammetrialla löydetyt alimmat vastinpisteet, ovat noin 10 metriä puuston keskipituuden alapuolella.

Radargrammetrialla tuotettu DTM suhteessa puuston pohjapinta-alaan

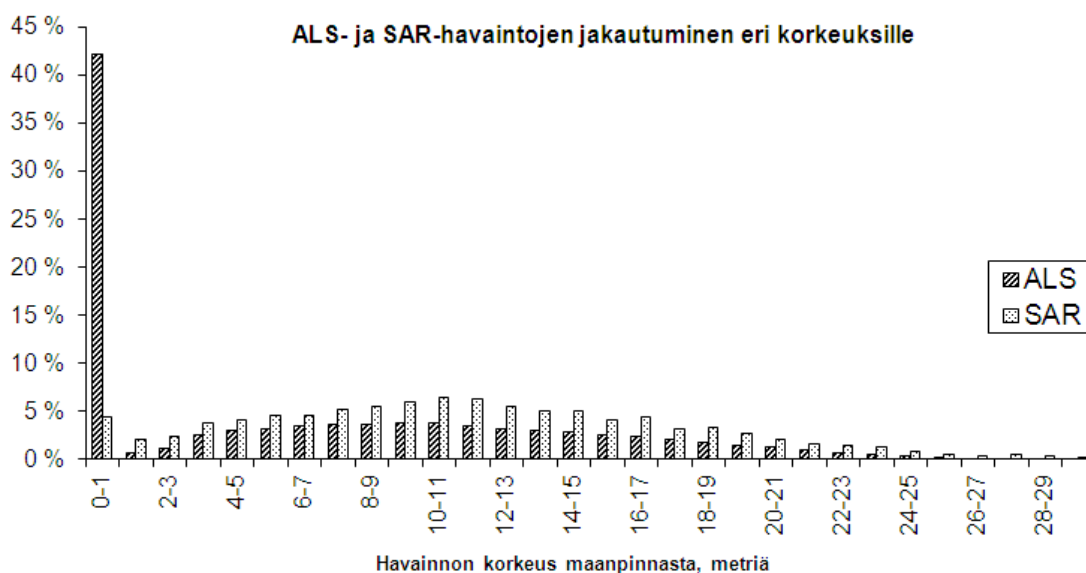


Kuva 18. Myös puuston pohjapinta-ala vaikuttaa vahvasti siihen, kuinka läheltä maanpintaa radargrammetrialla löydetään havaintoja.

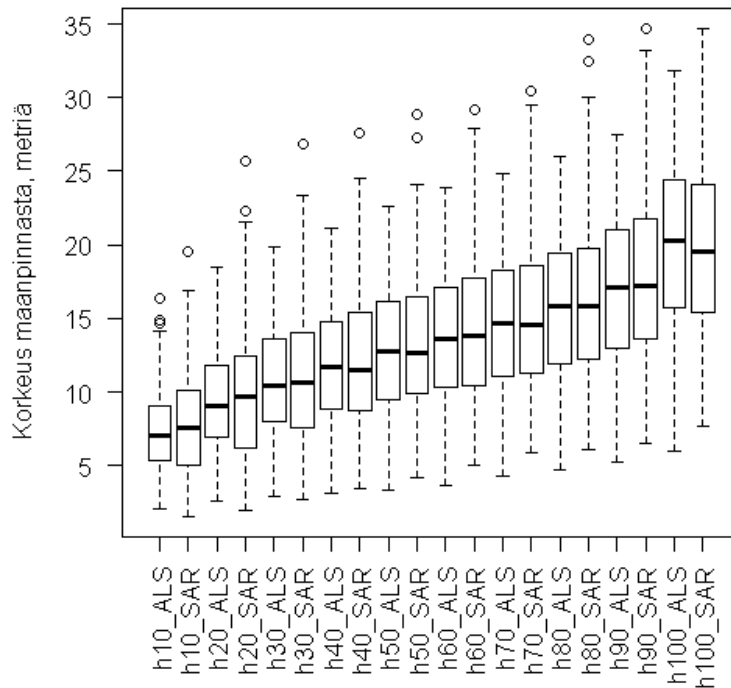
3.2 Koealoille irrotettujen ALS- ja SAR-piirteiden vertailu

Laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen 3D-pistepilvien ominaisuuksia verrattiin 192 referenssikoealalle ($r = 20$ metriä) leikattujen pisteiden avulla. Merkittävin ero ALS:n noin kymmenkertaisen havaintotiheyden lisäksi on se, että ALS läpäisee metsikön latvuserrosta huomattavasti paremmin kuin X-kanavan SAR-tutka: yli 40 % ALS-aineiston kaikista kaiuista heijastui alle metrin korkeudelta maanpinnasta, mutta vain muutama prosentti stereomitatuista vastinpisteistä löytyi läheltä maanpintaa (kuva 19).

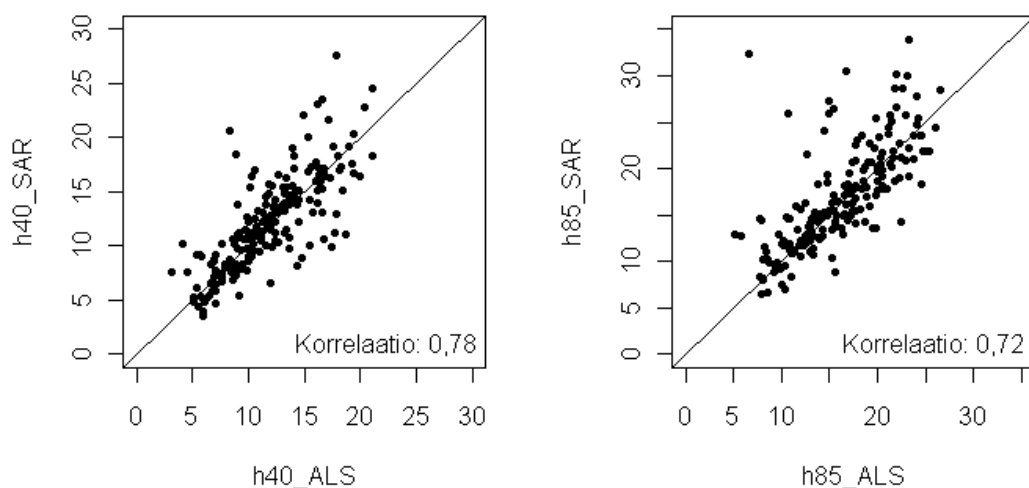
Kasvillisuushavaintojen osalta molempien pistepilvien korkeusjakaumat olivat hyvin samankaltaiset, mutta SAR-aineistossa koealojen välinen vaihtelu ja selvästi poikkeavien havaintojen määrä olivat suurempia (kuva 20). Kuten kuvasta 21 näkyy, korkeusjakaumien persentiilit saavat ALS- ja SAR-aineistoissa valtaosin samanlaisia arvoja, mutta muutamia selvästi poikkeavia havaintoja mahtuu koealojen joukkoon. Oletettavasti muutamilla koealoilla havaitut suuret erot persentiilien arvoissa johtuvat radargrammetrialla väärin tulkituista vastinpisteistä. Kuvassa 22 on esitetty, kuinka 3D-pistepilvistä irrotetut piirteet korreloivat puustotunnusten kanssa



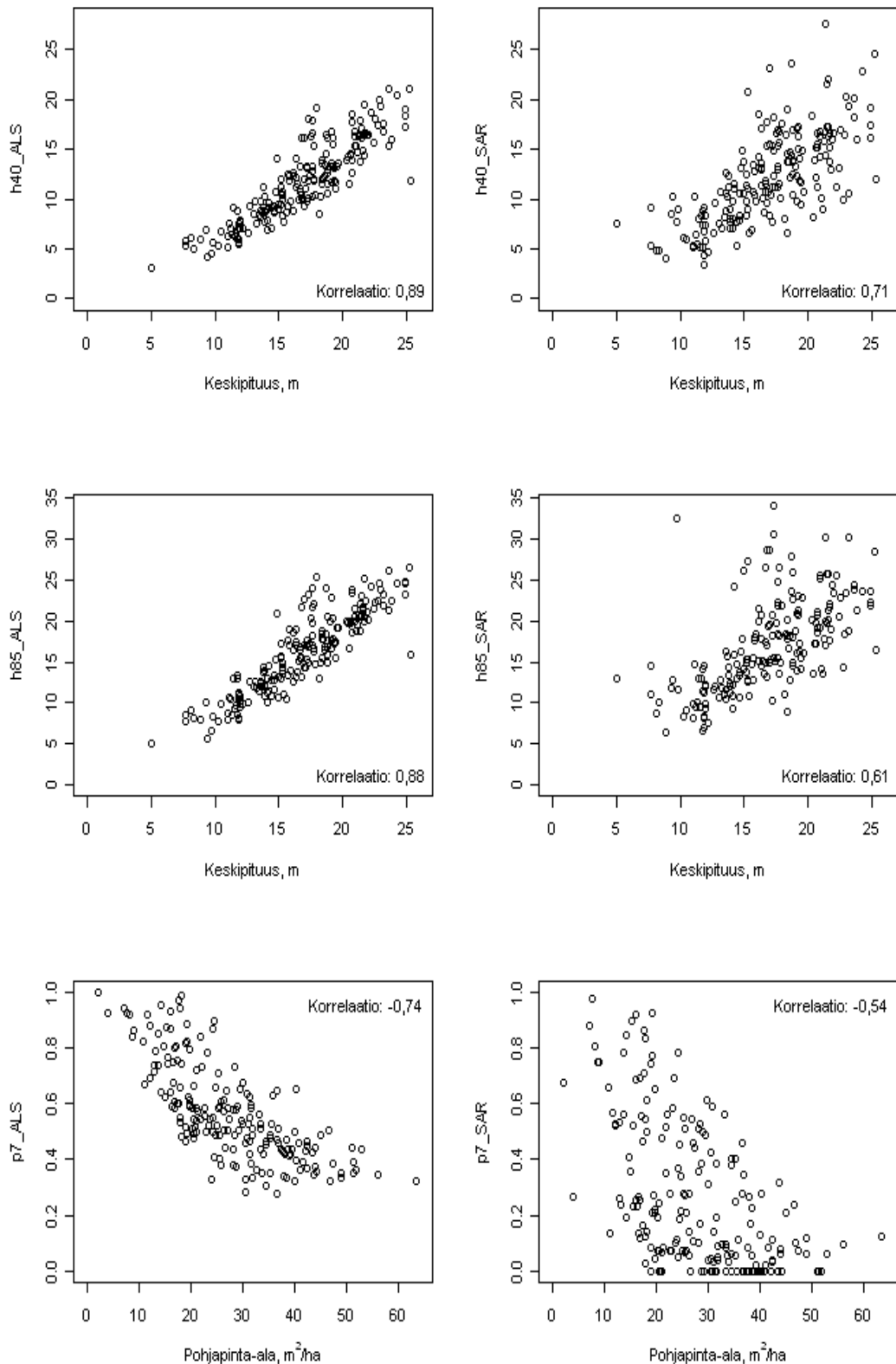
Kuva 19. ALS:lla ja radargrammetrialla tehtyjen havaintojen jakautuminen eri korkeuksille maanpinnasta. ALS tuottaa merkittävästi enemmän maapisteitä kuin SAR, mutta muutoin havaintojen jakauma on hyvin samankaltainen. Jakauma on laskettu metrin luokissa 192 koealalta ($r = 20$ m).



Kuva 20. Box-and-whisker -kuva ALS:n ja SAR:n kasvillisuushavaintojen korkeusjakaumasta 192 koealalla. Muuttujat kuvaavat pisteiden korkeusjakaumien persentiilejä. Paksu poikkiviiva kertoo koealojen mediaanin, ja laatikon ylä- ja alareuna kuvaavat ylä- ja alakvartiileita. Viikset kuvaavat koealojen minimi- ja maksimiarvoja lukuun ottamatta poikkeavia, ympyröillä merkittyjä havaintoja. Havainto on luokiteltu poikkeavaksi havainnoksi, jos se poikkeaa sekä ylä- että alakvartiilista enemmän kuin $1,5 \cdot$ (yläkvartiili-alakvartiili).



Kuva 21. Vertailua ALS- ja SAR-pistepilvien korkeusjakaumien kahdesta eri persentiilistä 192 koealalla. Vasemmalla 40. persentiili ja oikealla 85. persentiili.



Kuva 22. Ylemmissä kuvissa on verrattu kahta eri korkeusjakauman persenttiä (40. ja 85.) koealalla mitattuun puuston keskipituuteen. Alarivissä on verrattu 7 metrin korkeudelta laskeutua suhteellista tiheyttä (havainnot 7 metrin alapuolelta suhteessa kaikkiin havaintoihin) koealan puuston pohjapinta-alaan. Vasemmassa sarakkeessa ALS ja oikeassa SAR.

3.3 Metsävaratiedon estimoinnin tarkkuus koealatasolla

Koealakohtainen metsävaratieto estimoitiin ei-parametrisella k-MSN -menetelmällä, ja tulosten tarkkuutta arvioitiin leave-one-out -ristiinvalidoinnilla. Koealakohtaisten estimaattien ja maastomittausten perusteella laskettiin mallin tuottamien estimaattien harha ja RMSE koealan kokonaistilavuudelle (taulukko 4), biomassalle (taulukko 5), pohjapinta-alalle (taulukko 6) ja keskipituudelle (taulukko 7). Menetelmien hyvyttä on tarkasteltu viidellä eri k-parametrin arvolla.

Laserkeilaustulkinnan osalta tarkastelussa ovat mukana kaikki maastossa mitatut 207 referenssikoealaa. Radargrammetrian osalta koealakohtaisia estimaatteja ei saatu laskettua aineiston heikon pistetiheyden takia 15 koealalle, joten tarkastelussa on mukana 192 referenssikoealaa. Koealojen puuston kokonaistilavuus oli 6–700 m³/ha keskitilavuuden ollessa noin 230 m³/ha ja keskihajonnan ollessa noin 120 m³/ha. Lähimmän naapurin menetelmä keskiarvoistaa tuloksia vaihteluvälin molemmissa ääripäissä, mikä on nähtävissä kuvassa 23, jossa on kuvattu mitattujen ja estimoitujen tunnusten välistä riippuvuutta.

Taulukko 4. Laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen kokonaistilavuuden estimaattien tarkkuus koealatasolla k-MSN -menetelmän eri k-parametrin arvoilla.

	k	harha, m ³ /ha	harha, %	RMSE, m ³ /ha	RMSE, %
ALS	1	4,2	1,8	93,7	40,4
ALS	3	-0,8	-0,4	72,8	31,4
ALS	5	-2,0	-0,9	69,1	29,8
ALS	7	-2,6	-1,1	68,7	29,6
ALS	9	-2,9	-1,2	70,0	30,2
SAR	1	-5,8	-2,5	112,4	49,3
SAR	3	0,4	0,2	96,9	42,5
SAR	5	2,7	1,2	91,8	40,3
SAR	7	2,8	1,2	92,4	40,6
SAR	9	1,4	0,6	92,6	40,6

Taulukko 5. Laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen biomassaestimaattien tarkkuus koealatasolla k-MSN -menetelmän eri k-parametrin arvoilla.

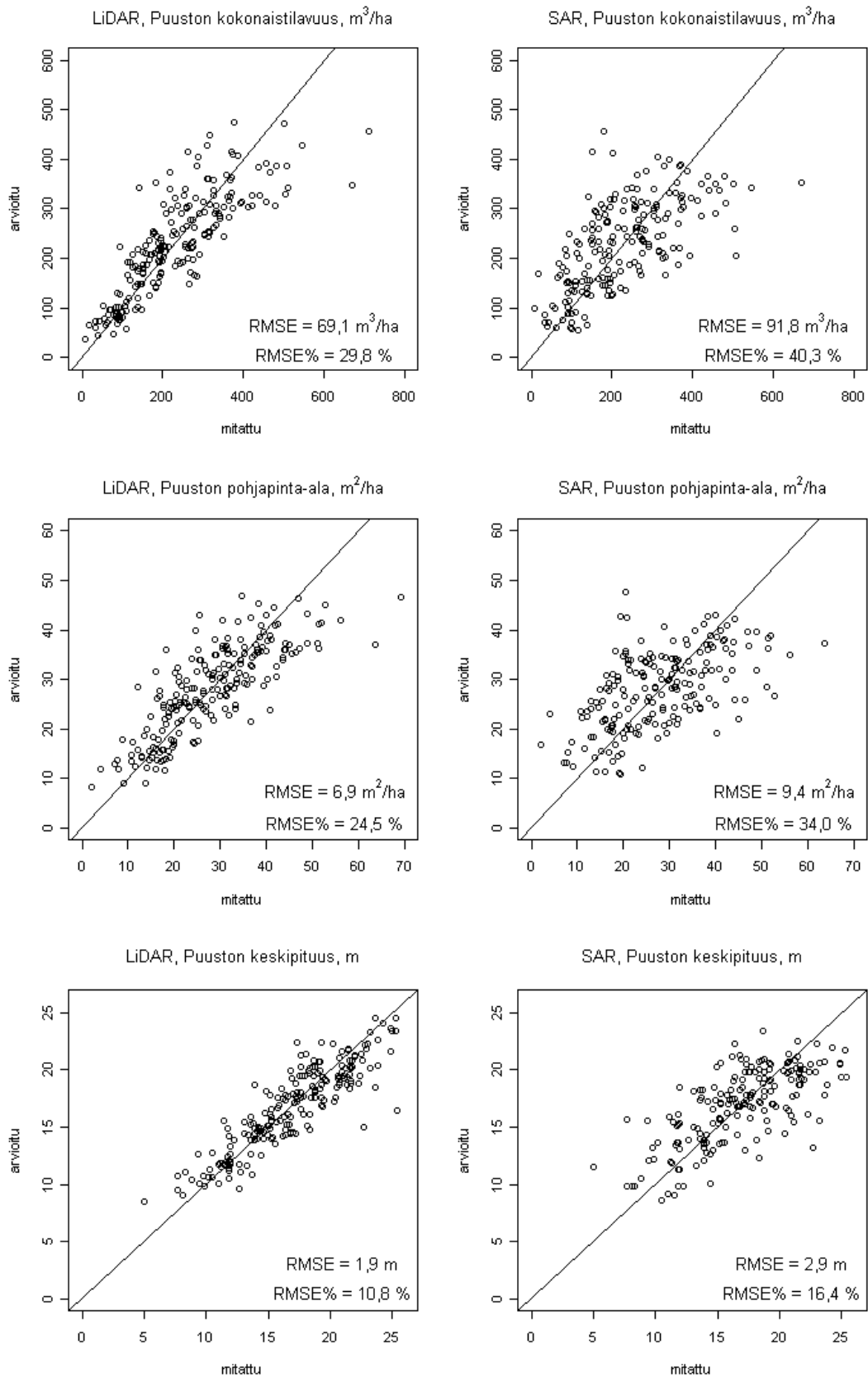
	k	harha, t/ha	harha, %	RMSE, t/ha	RMSE, %
ALS	1	1,9	1,7	43,6	37,4
ALS	3	-0,1	-0,0	33,3	28,6
ALS	5	-0,3	-0,2	31,7	27,2
ALS	7	-0,5	-0,4	31,7	27,2
ALS	9	-0,7	-0,6	32,3	27,7
SAR	1	-2,9	-2,5	55,4	48,2
SAR	3	0,4	0,3	48,4	42,1
SAR	5	1,4	1,2	45,8	39,9
SAR	7	1,3	1,1	46,1	40,1
SAR	9	0,6	0,5	46,2	40,2

Taulukko 6. Laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen pohjapinta-alaestimaattien tarkkuus koealatasolla k-MSN -menetelmän eri k-parametrin arvoilla.

	k	harha, m ² /ha	harha, %	RMSE, m ² /ha	RMSE, %
ALS	1	0,5	1,8	9,1	32,5
ALS	3	0,1	0,4	7,3	26,0
ALS	5	0,0	0,0	6,9	24,5
ALS	7	0,0	0,1	6,9	24,9
ALS	9	-0,0	-0,1	7,1	25,4
SAR	1	-0,3	-1,1	11,5	41,7
SAR	3	0,1	0,4	9,9	35,8
SAR	5	0,3	0,9	9,4	34,0
SAR	7	0,2	0,8	9,5	34,2
SAR	9	0,1	0,5	9,5	34,5

Taulukko 7. Laserkeilauksella ja radargrammetrialla tuotettujen keskipituusestimaattien tarkkuus koealatasolla k-MSN -menetelmän eri k:n arvoilla.

	k	harha, m	harha, %	RMSE, m	RMSE, %
ALS	1	-0,1	-0,5	2,6	14,6
ALS	3	-0,1	-0,7	2,0	11,3
ALS	5	-0,1	-0,7	1,9	10,8
ALS	7	-0,2	-1,0	1,9	10,6
ALS	9	-0,2	-0,9	1,9	10,5
SAR	1	-0,2	-1,1	4,1	22,8
SAR	3	-0,1	-0,3	3,2	18,2
SAR	5	0,0	0,2	2,9	16,4
SAR	7	0,1	0,3	2,9	16,3
SAR	9	0,4	0,0	2,8	15,9



Kuva 23. Vasemmassa sarakkeessa ALS:lla ja oikeassa sarakkeessa radargrammetrialla tuotetut puuston kokonaistilavuuden, pohjapinta-alan ja keskipituuden koelatason estimaatit suhteessa maastossa mitattuihin tunnuksiin k-parametrin arvolla 5.

3.4 Metsävaratiedon estimoinnin tarkkuus kuviotasolla

Radargrammetria on potentiaalinen vaihtoehto laajojen alueiden inventointiin, joten menetelmää tutkittiin laskemalla puuston tilavuus- ja biomassaeestimaatit metsikkökuvioille luvussa 2.8 esitetyllä tavalla. Tulkinta tehtiin 1773 kuviolle, joiden keskikoko oli 0,69 ha ja mediaanikoko 0,44 ha. Yhteenvedo ALS-tulkintaan perustuvista kuvioiden puustotunnuksista on esitetty taulukossa 8. ALS-tulkintaa pidettiin kuviotasoon referenssinä radargrammetrian tarkkuudelle. Koska radargrammetriaa voidaan pitää kilpailevana kaukokartoitusmenetelmänä optisen alueen satelliittikuvulle, sitä on mielenkiintoista verrata kuviotasolla Metsäntutkimuslaitoksen tuottamaan monilähteiseen VMI:hin (luku 2.9).

Radargrammetrian tilavuusestimaattien RMSE oli 63,4 m³/ha ja suhteellinen RMSE 32,8 %. Biomassaeestimaattien RMSE oli 32,2 t/ha ja RMSE% 33,4 %. Yli kahden hehtaarin laajuisilla kuvioilla estimointitarkkuus on kuitenkin merkittävästi parempi: molemmille tunnuksille suhteellinen RMSE on vain hieman yli 20 %. Tuloksissa on nähtävissä suuri, negatiivinen harha, joka selvästi heikentää inventoinnin tarkkuutta. Myös pohjapinta-ala on systemaattisesti yliarvioitu, mutta sen sijaan puuston keskipituus on radargrammetrialla arvioitu tarkasti ja harhattomasti. (taulukot 9–12)

MVMI:n tilavuusestimaattien RMSE oli 76,9 m³/ha ja suhteellinen RMSE 39,8 %. Biomassaeestimaattien RMSE oli 33,8 t/ha ja suhteellinen RMSE 35,1 %. Satelliittikuviin perustuva puustotulkinta on keskimäärin aliarvioinut puuston määrää, koska tulokset saturoituvat suurissa biomassoissa (taulukot 9-10).

Taulukko 8. Tilastollisia tunnuslukuja kuvioiden välisestä vaihtelusta.

	Hg, m	BA, m ² /ha	VOL, m ³ /ha	AGB, t/ha
minimi	9,9	10,7	56,3	30,1
keskiarvo	16,9	23,8	193,2	96,4
maksimi	24,0	45,7	451,9	223,5
keskihajonta	2,7	6,4	71,6	34,9

Taulukko 9. Puuston kokonaistilavuuden estimaattien tarkkuus kuviotasolla erikokoisilla metsikkökuvioilla verrattuna laserkeilaustulkintaan.

	pinta-ala, ha	kuvioita luokassa	harha, m ³ /ha	harha, %	RMSE, m ³ /ha	RMSE, %
SAR	kaikki	1773	-34,4	-17,8	63,4	32,8
SAR	< 0,5	987	-36,7	-19,5	72,1	38,3
SAR	0,5–1,0	476	-33,8	-17,1	55,0	27,8
SAR	1,0–2,0	223	-28,1	-13,8	43,4	21,3
SAR	> 2,0	87	-28,4	-14,1	40,8	20,2
MVMI	kaikki	1770	38,6	20,0	76,9	39,8
MVMI	< 0,5	984	38,3	20,4	82,7	44,1
MVMI	0,5–1,0	476	40,0	20,3	69,6	35,2
MVMI	1,0–2,0	223	39,2	19,2	70,7	34,7
MVMI	> 2,0	87	32,3	16,0	59,7	29,6

Taulukko 10. Puuston biomassaestimaattien tarkkuus kuviotasolla erikokoisilla metsikkökuvioilla verrattuna laserkeilaustulkintaan.

	pinta-ala, ha	kuvioita luokassa	harha, m ³ /ha	harha, %	RMSE, m ³ /ha	RMSE, %
SAR	kaikki	1773	-18,3	-19,0	32,2	33,4
SAR	< 0,5	987	-19,6	-20,9	36,5	38,9
SAR	0,5–1,0	476	-17,8	-18,1	28,3	28,7
SAR	1,0–2,0	223	-14,8	-14,6	22,3	21,9
SAR	> 2,0	87	-14,6	-14,5	20,6	20,4
MVMI	kaikki	1770	7,0	7,2	33,8	35,1
MVMI	< 0,5	984	6,7	7,2	37,4	40,0
MVMI	0,5–1,0	476	7,7	7,8	29,1	29,5
MVMI	1,0–2,0	223	7,6	7,4	29,6	29,0
MVMI	> 2,0	87	4,4	4,3	23,6	23,3

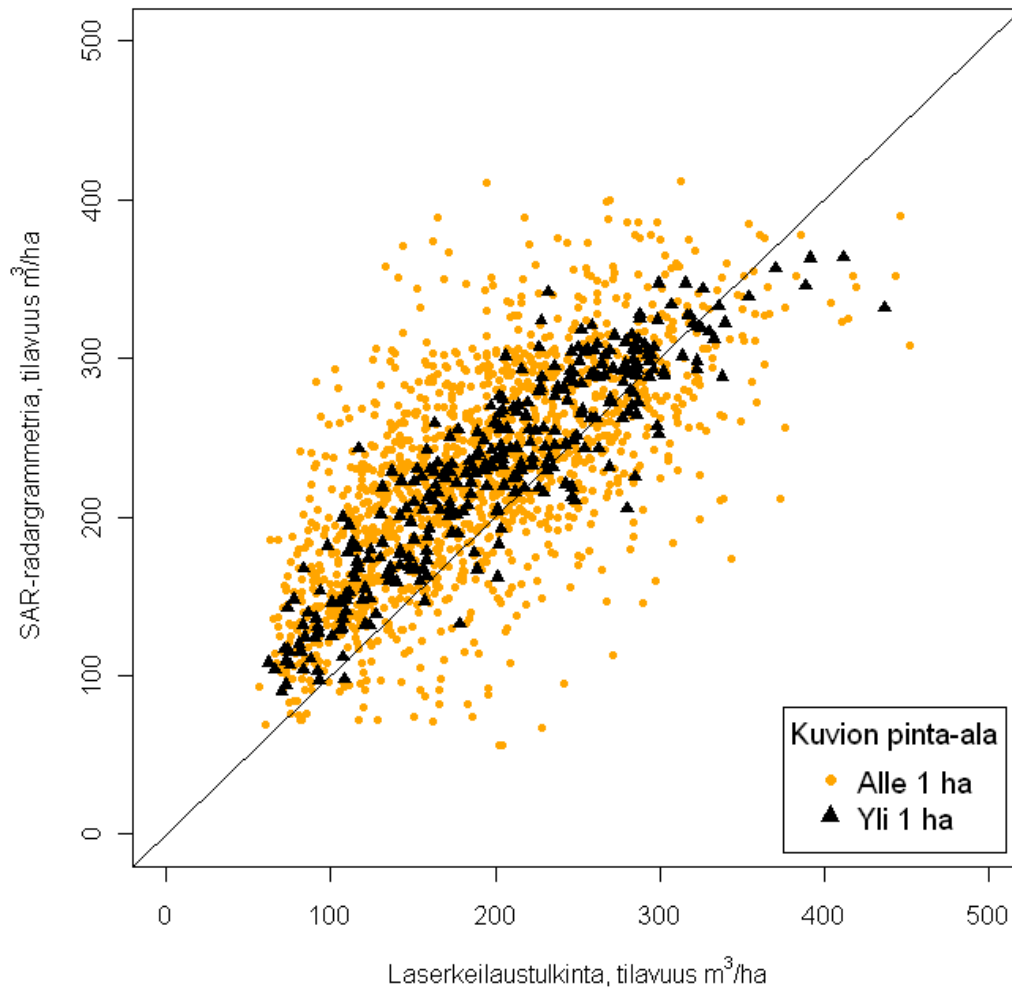
Taulukko 11. Puuston pohjapinta-alan estimaattien tarkkuus kuviotasolla erikokoisilla kuvioilla verrattuna laserkeilaustulkintaan.

	pinta-ala, ha	kuvioita luokassa	harha, m ² /ha	harha, %	RMSE, m ² /ha	RMSE, %
SAR	kaikki	1773	-3,9	-16,4	8,4	35,3
SAR	< 0,5	987	-4,2	-18,2	8,2	35,4
SAR	0,5–1,0	476	-3,8	-15,5	8,4	34,6
SAR	1,0–2,0	223	-3,2	-12,7	8,9	35,9
SAR	> 2,0	87	-3,0	-12,1	8,9	36,1

Taulukko 12. Puuston keskipituusestimaattien tarkkuus kuviotasolla erikokoisilla kuvioilla verrattuna laserkeilaustulkintaan.

	pinta-ala, ha	kuvioita luokassa	harha, m	harha, %	RMSE, m	RMSE, %
SAR	kaikki	1773	-0,23	-1,4	1,82	10,8
SAR	< 0,5	987	-0,18	-1,0	2,12	12,6
SAR	0,5–1,0	476	-0,26	-1,5	1,42	8,3
SAR	1,0–2,0	223	-0,28	-1,6	1,21	7,1
SAR	> 2,0	87	-0,51	-3,0	1,15	6,9

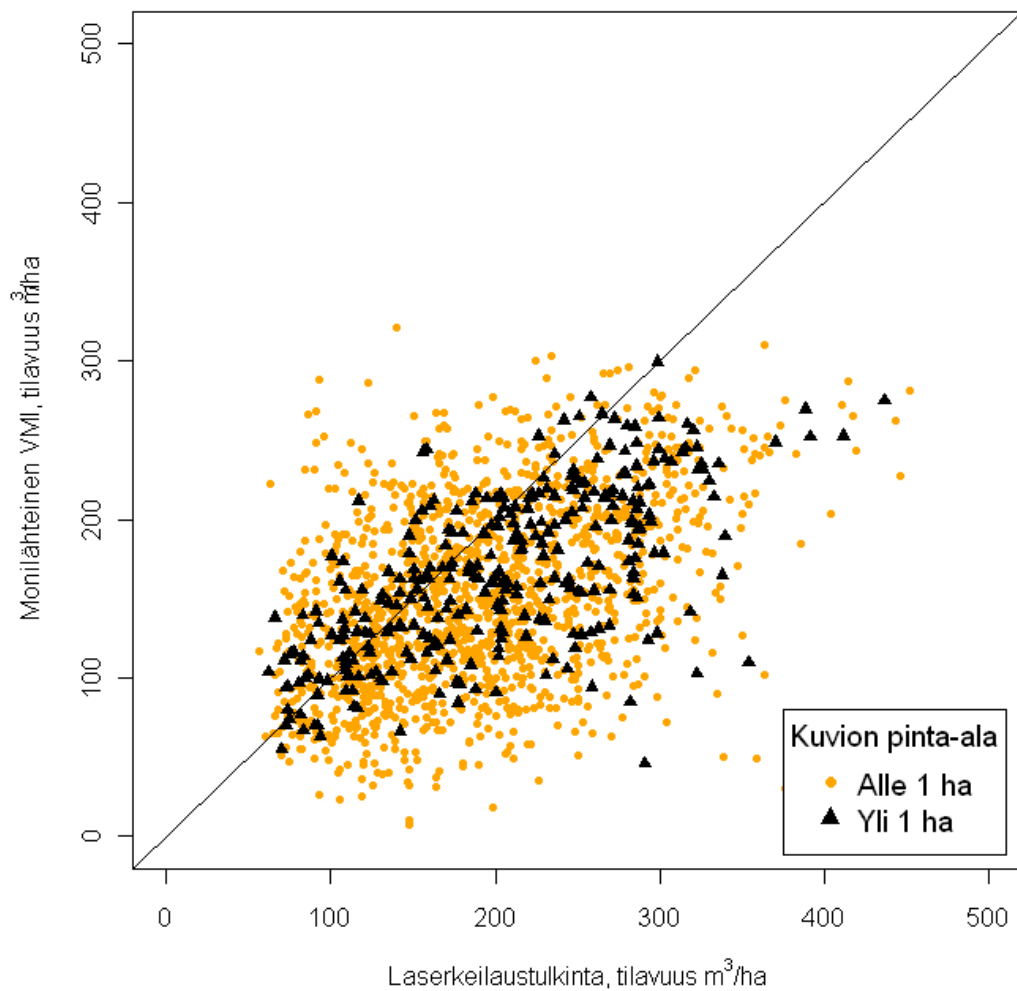
Kuvioittainen puuston kokonaistilavuus SAR-radargrammetrialla



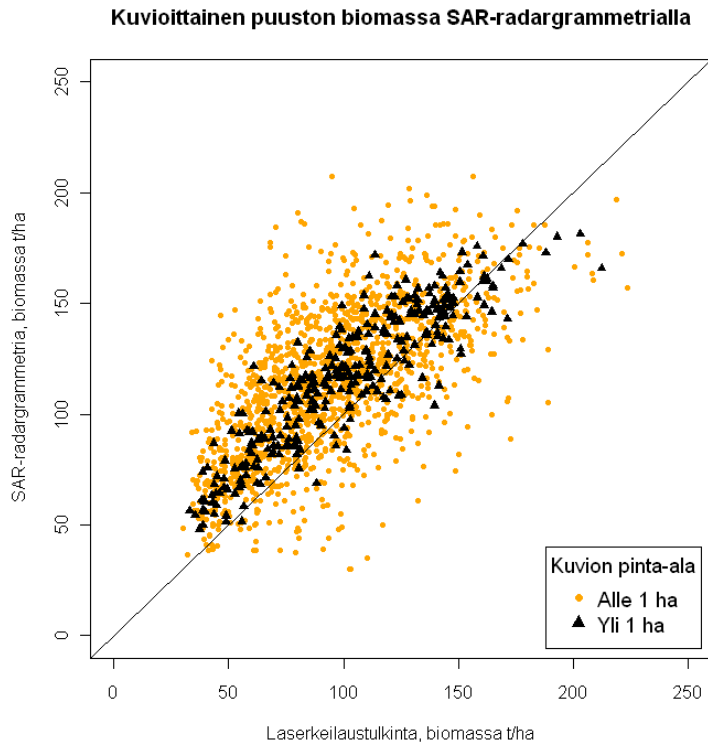
Kuva 24. Radargrammetrialla tuotettujen puuston tilavuusestimaattien suhde laserkeilaustulkintaan kuviotasolla.

Kuvassa 24 on havainnollistettu ALS:lla ja radargrammetrialla tulkittuja kuvioittaisia tilavuusestimaatteja. Yli hehtaarin kokoisilla kuvioilla radargrammetria toimii hyvin, mutta aiheuttaa systemaattisia tilavuuden yliarvioita. MVMI:n tuloksille on tehty vastaava tarkastelu kuvassa 25, jossa saturaotumisilmiö näkyy selvästi. Sekä edellä mainittu kuvapari että vastaavat biomassaeestimaattien perusteella tehdyt kuvat 26 ja 27 osoittavat radargrammetrian olevan potentiaalinen, kilpaileva menetelmä optisen alueen satelliittikuville laajojen alueiden kartoituksessa.

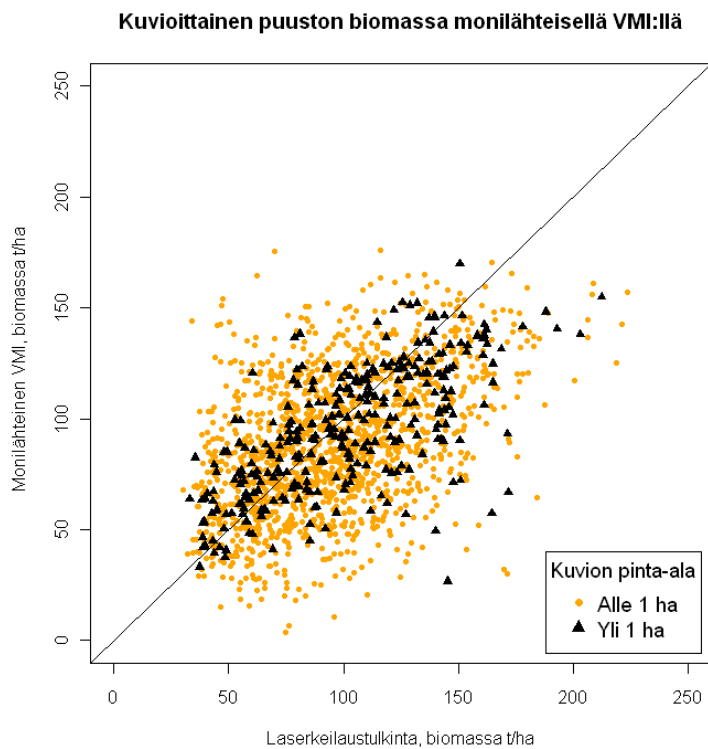
Kuvioittainen puuston kokonaistilavuus monilähteisellä VMI:llä



Kuva 25. MVMI:llä tuotettujen puuston tilavuusestimaattien suhde laserkeilaustulkintaan kuviotasolla. Alkuperäisen VMI-aineiston © Metsäntutkimuslaitos, 2012.



Kuva 26. Radargrammetrialla arvioidun AGB:n suhde vastaavaan ALS-tulkintaan kuvioilla.



Kuva 27. MVMI:llä arvioidun AGB:n suhde vastaavaan laserkeilaustulkintaan kuviotasolla. Alkuperäisen VMI-aineiston © Metsäntutkimuslaitos, 2012.

Kuvioittaista puuston kokonaistilavuuden inventointia tarkasteltiin luokittelemalla yli hehtaarin kokoiset kuviot ALS:lla tulkitun puuston tilavuuden ja pohjapinta-alan perusteella erilaisiin luokkiin. Niissä metsissä, joissa puuston tilavuus on alle 200 m³/ha, tilavuusestimaattien RMSE on noin 45 m³/ha ja harha noin -40 m³/ha. Myös harvoissa, tilavuudeltaan 200–300 m³/ha metsiköissä on suuri RMSE (48 m³/ha) ja harha (-37 m³/ha), tosin kyseisessä luokassa oli varsin niukasti referenssikoealoja. Parhaaseen kuviotason inventointitarkkuuteen päästiin vanhoissa, järeissä metsissä, joissa tilavuusestimaattien suhteellinen RMSE on jopa alle 10 %. (taulukko 13)

Taulukko 13. Radargrammetrialla tuotettujen puuston kokonaistilavuusestimaattien vertailu erilaisilla puuston kokonaistilavuuden ja pohjapinta-alan perusteella luokitelluilla kuvioilla. Tarkastelussa ovat mukana pinta-alaltaan yli yhden hehtaarin suuruiset kuviot.

luokka	kuvioita luokassa	koealoja luokassa	harha, m ³ /ha	harha, %	RMSE, m ³ /ha	RMSE, %
Kaikki yli 1 ha kuviot	310	192	-28,2	-13,8	42,7	21,0
Tilavuus alle 100 m³/ha	28	27	-40,7	-49,8	44,9	55,0
Tilavuus 100–200 m³/ha	117	66	-42,3	-28,1	49,5	32,9
Harvat puustot (Ppa ≤ 18 m ² /ha)	31	15	-43,6	-38,3	49,0	43,1
Tiheät puustot (Ppa ≥ 23 m ² /ha)	22	22	-36,1	-19,2	42,5	22,6
Tilavuus 200–300 m³/ha	141	47	-21,3	-8,6	37,4	15,1
Harvat puustot (Ppa ≤ 26 m ² /ha)	32	11	-37,0	-17,4	47,9	22,6
Tiheät puustot (Ppa ≥ 30 m ² /ha)	59	25	-7,2	-2,6	27,6	9,9
Tilavuus yli 300 m³/ha	24	52	15,1	4,4	31,6	9,3

4. POHDINTA

Tutkielman perusteella radargrammetria vaikuttaa toimivan erittäin huonosti DTM:n tuottamisessa sekä metsässä että aukeilla, joten metsävarojen kartoittaminen stereokuvamitatun 3D-tiedon avulla näyttäisi riippuvan tarkan DTM:n saatavuudesta. On kuitenkin huomioitava, että gradussa käytettiin ainoastaan TerraSAR-X -satelliitin lyhyellä säteilyn aallonpituudella ottamia tutkakuvia, jotka sisältävät informaatiota lähinnä latvuston yläosasta. Kuten muun muassa Le Toan ym. (1992) ja Holopainen ym. (2009) ovat todenneet, tutkasatelliitin pisimmät aallonpituudet läpäisevät lyhyitä aallonpituuksia paremmin metsän latvuserroksen ja tuottavat havaintoja myös maasta. Esimerkiksi L- ja X-kanavien tiedon yhdistämisellä päästäisiin todennäköisesti pelkkää X-kanavaa paremmin selville metsikön vertikaalisesta rakenteesta.

Puiden latvusten korkeuden arvioinnissa radargrammetria osoittautui jo Perkon ym. (2011) sekä Vastarannan ym. (2012a) tutkimuksissa lähes ALS:n vertaiseksi kaukokartoitusmenetelmäksi, mitä voidaan tukea myös opinnäytetyön tuloksien perusteella (taulukko 7). Sen sijaan puuston pohjapinta-alan kanssa SAR-pistepilvestä irrotetut kasvillisuuden tiheyttä kuvaavat piirteet korreloivat merkittävästi ALS-pistepilvestä irrotettuja piirteitä huonommin (kuva 22), minkä takia pohjapinta-alan estimointi onnistui stereomitattujen pisteiden perusteella huomattavasti ALS-tulkintaa heikommin (taulukko 6). Pohjapinta-alan arviointitarkkuus ei parane edes kuviokoon kasvassa, mikä kertoo aineiston huonosta kyvystä selittää puuston tiheyden vaihtelua (taulukko 11).

Vastarannan ym. (2013) artikkelissa koealojen puuston kokonaistilavuus tulkittiin ALS:lla 23,4 % ja radargrammetrialla 29,9 % suhteellisella RMSE:llä. Gradun tuloksissa vastaavat virhetunnukset olivat samalla tutkimusalueella, osittain samoilla koealoilla ja lähes samoilla menetelmillä merkittävästi huonommat: 27,2 % ja 39,9 %. Huonommat tulokset selittyvät sillä, että graduaineistossa koealaotos jakautui tasaisemmin puuston eri kehitysluokkiin ja koealojen välinen vaihtelu oli suurempaa. Gradussa yksi virhelähde on myös se, että maastomittauksia oli tehty eri vuosina, ja kasvumallinnukseen liittyy aina epävarmuutta. Joka tapauksessa kyseinen vertailu on hyvä esimerkki koealavalinnan vaikutuksesta tuloksiin.

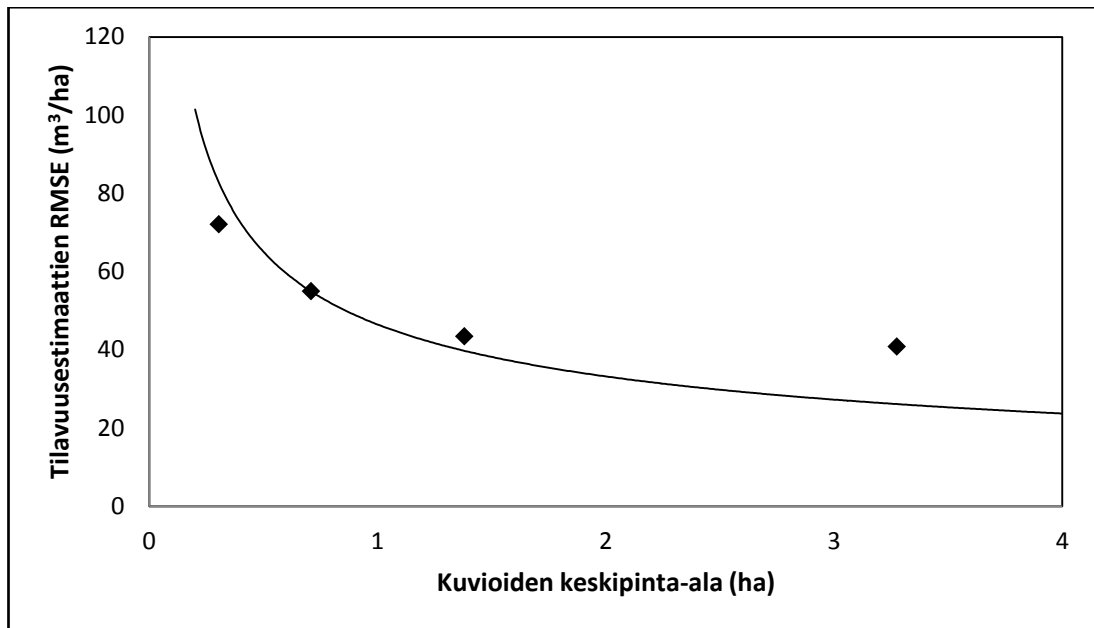
Taulukko 14. Yhteenveto eri tutkimuksissa ja eri kaukokartoitusmenetelmillä havaitusta metsävaratietojen inventoinnin tarkkuudesta koealatasolla. Radargrammetria vaikuttaa sijoituvan tarkkuudeltaan laserkeilauksen ja optisen alueen satelliittikuvien väliin.

Kaukokartoitusmenetelmä	Tiedonkeruulaite	Tutkimus	VOL/AGB estimointitarkkuus (RMSE%)
Optiset satelliittikuvat	Landsat ETM	Franco-Lopez ym. 2001	65 %
		Tuominen & Haakana 2005	74,5 %
		Holopainen ym. 2009	58,3 %
	SPOT-4 XS	Holmström & Fransson 2003	64 %
LiDAR: Aluepohjainen lähestymistapa (ABA)	Harvapulssinen ALS	Packalén & Maltamo 2007	20,5 %
		Hollaus ym. 2007	21,4 %
		Breidenbach ym. 2010	20,6 %
		Vastaranta ym. 2013	23,4–24,7 %
		<i>M. Niemen gradu 2013</i>	<i>27,2–29,8 %</i>
Yksinpuintulkinta (ITD)	Tiheäpulssinen ALS	Breidenbach ym. 2010	17,1 %
SAR-tutkakuvat	TerraSAR-X	Holopainen ym. 2010	55,8 %
SAR-interferometria	TanDEM-X (+ ALS-DTM)	Solberg ym. 2013	43–44 %
SAR-radargrammetria	TerraSAR-X (+ ALS-DTM)	Vastaranta ym. 2013	29,9–30,2 %
		<i>M. Niemen gradu 2013</i>	<i>39,9–40,3 %</i>

Verrattaessa eri kaukokartoitusmenetelmillä saatuja koealatasen tuloksia puuston kokonaistilavuuden ja maanpäällisen biomassan arviointitarkkuudesta (taulukko 14), voidaan todeta jo ensimmäisten SAR-radargrammetriaan liittyvien tutkimustulosten olevan selvästi 2D-satelliittikuvatulkintaa parempia. Merkittävin kehitysaskel 2D- ja 3D-tietoon perustuvien puustotulkintojen välillä on 3D-tiedon avulla saatujen tulosten saturoitumattomuus (kuvat 24–27). Gradussa tehty radargrammetrian ja MVMI:n välinen vertailu ei kuitenkaan ole täysin reilu, koska radargrammetriassa käytettiin samoja koealoja kuin tulosten referenssinä pidetyssä ALS-tulkinnassa, mutta MVMI:n koealaverkko on ollut selvästi harvempi. Kuten Vastarannan ym. (2013) ja tämän gradun tuloksia vertailtaessa jo havaittiin, eri aineistoilla tehtyihin tarkkuusvertailuihin pitää aina suhtautua kriittisesti. Radargrammetrian ja MVMI:n vertailua voidaan kuitenkin pitää suuntaa-antavana, ja erityisesti saturoitumattomuutensa ansiosta SAR-stereomittaus näyttäisi tuovan lisäarvoa VMI:n kaltaiseen laajojen alueiden inventointiin.

Kuviotason tulosten keskeinen ja mielenkiintoinen havainto oli kokonaistilavuuden, biomassan ja pohjapinta-alan arvioiden huomattava harha (taulukot 9–11). Koska tulokset olivat koealatasolla harhattomia, kuviotason harhan on johduttava siitä, että koealat edustivat huonosti koko tutkimusalueen puustoa. Kaikki koealat oli sijoitettu metsikkökuvioden keskelle välttämättä suuria latvusaukkoja ja kuviorajoja, jotka piste-pilvien visuaalisessa tarkastelussa kuvissa 6 ja 7 havaittiin stereokuvamittauksen ongelmakohteiksi. Kuviotason tulosten systemaattinen yliarvio johtuneen siitä, että kuvioden sisälle osuu usein kyseisiä ongelmakohteita, joiden puusto yliarvioidaan. Harhattomien kuviotason tulosten saamiseksi koealaotoksen pitäisi kattaa satunnaisesti koko tutkimusalue latvusaukkoineen ja kuviorajoineen. Harhattomien kuviotason estimaattien kustannuksena koealatasen puustotunnusten inventointivirheet todennäköisesti kasvaisivat.

Kuviotason tuloksissa radargrammetrian inventointivirhe odotetusti pieneni koealatasen virheiden kumotessa toisiaan, mutta tulosten parantuminen kuviokoon kasvaessa oli silti heikompaa kuin Hyypän ja Hyypän (2001) esittämässä mallissa (kuva 28). Oletettavasti stereokuvamitatun aineiston huono herkkyys puuston pohjapinta-alan vaihtelulle sekä estimaattien harhaisuus rajoittavat kuviotason tulosten parantumista kuviokoon kasvaessa.



Kuva 28. Pisteillä on kuvattu opinnäytetyössä erikokoisille kuviolle raportoidut tilavuusestimaattien RMSE:t (taulukko 9) suhteessa kyseisen luokan kuvioiden keskipinta-alaan. Kuvioiden pinta-alan vaikutusta inventoinnin tarkkuuteen on verrattu Hyypän ja Hyypän (2001) artikkelissa esitettyyn malliin, joka kuvaa RMSE:n muutosta kuviokoon funktiona SPOT Pan -satelliittikuvien perusteella tehdyssä puustotulkinnassa. Gradun tulokset eivät parane kuvion pinta-alan kasvaessa yhtä paljon kuin Hyypien raportoimassa mallissa.

Aiemmat Perkon ym. (2011), Karjalaisen ym. (2012) ja Vastarannan ym. (2013) koealatasen tutkimukset nostivat suuria odotuksia radargrammetrian soveltuvuudesta muun muassa laajojen alueiden inventointiin sekä biomassamuutosten seurantaan. Myös tässä tutkimuksessa saadut koealatasen tulokset olivat lupaavia, ja erityisesti järeissä metsissä havaittu kuviotason tilavuusestimaattien alle 10 % suhteellinen RMSE oli mielenkiintoinen havainto (taulukko 13). Samoin koealojen ALS- ja SAR-piirteiden vertailu osoitti radargrammetrialla tehtyjen havaintojen korkeusjakauman olevan koealoilla likimain samankaltainen kuin LiDAR:n paluukaikujen jakauma. Kuviotason tulosten vertaaminen Hyypien malliin aiheutti kuitenkin pettymyksen, sillä radargrammetrialla lasketut kuviotason tulokset eivät parantuneet kuviokoon kasvaessa odotetusti. Jatkotutkimusten haasteena on kuviotason tulosten korjaaminen harhattomiksi, minkä jälkeen tulosten vertailu eri kaukokartoitusmenetelmiin olisi mielekkäämpää.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli tehdä käytännönläheistä selvitystä radargrammetrian sovellusmahdollisuuksista. Stereokuvamitatun 3D-pistepilven perusteella voidaan arvioida latvuston korkeus erittäin tarkasti, mutta puuston tiheyttä on vaikea tulkita kyseisen aineiston avulla. Koska radargrammetria ei tuota luotettavia maahavaintoja, biomassan kartoitus vaatii toimiakseen eri menetelmällä, yleensä laserkeilauksella tuotetun DTM:n olemassaolon, mikä rajoittaa radargrammetrian hyödyntämistä.

Mikäli SAR-stereokuvien saatavuus paranee tulevaisuudessa, radargrammetria on ehdottomasti potentiaalinen vaihtoehto biomassan kartoitukseen niillä alueilla, joilta on saatavissa tarkka DTM. Järeissä metsissä tilavuusestimaattien suhteellinen RMSE oli peräti alle 10 %, eikä tulosten saturoitumista havaittu. Sen sijaan menetelmän soveltuminen esimerkiksi suurten pohjoismaalaisten metsänomistajien strategisen suunnittelun tarpeisiin on kyseenalaista, koska gradun tulosten perusteella puuston tiheyden arviointi on hyvin epävarmaa. Esimerkiksi metsikkökuvioiden harvennus-tarpeen ja -ajankohdan arviointi ei todennäköisesti onnistu pelkästään ylimmästä latvuserroksesta havaintoja tuottavan X-kanavan avulla. Metsien muutostulkintaan liittyvien sovellusten kannalta puuston pituuskasvun seuraaminen onnistuu radargrammetrian avulla varmasti, mutta puuston tiheydessä tai järeydessä tapahtuneiden muutosten seuranta vaikuttaa epävarmalta. Merkittävä ongelma on myös latvustossa olevien aukkojen täytyminen virheellisesti tulkituista vastinpisteistä, mikä haittaa esimerkiksi kehitysmaissa tapahtuvien laittomien hakkuiden seurantaa.

Yhteenvetona gradussa saadut tulokset puuston kokonaistilavuuden ja biomassan estimointitarkkuudesta olivat koealatasolla erittäin lupaavia, ja menetelmän haasteet tulivat esiin vasta kuviotason puustotulkinnassa. Stereokuvamittauksella saadaan kiitettävästi tietoa puuston pituudesta, mutta jatkotutkimuksissa kannattaisi selvittää, millaisella aineistolla puuston pohjapinta-ala voitaisiin arvioida tarkemmin. SAR-satelliitin X- ja L-kanavien informaation yhdistäminen saattaisi tuoda tarvittavaa lisätietoa puuston tiheydestä. Toinen keskeinen tutkimusongelma on automaattisen stereomittauksen kehittäminen siten, että virheelliset vastinpistetulkinnat pystyttäisiin välttämään ja latvustossa olevat aukot erottamaan.

LÄHTEET

- Bamler, R. 2000. Principles of Synthetic Aperture Radar. *Surveys in Geophysics* 21: 147–157.
- Bamler, R. & Hartl, P. 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14. R1–R54.
- Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T. & Solberg, S. 2010. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 114: 911–924.
- Comaniciu, D. & Meer, P. 2002. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 24(5): 603–619.
- DLR (German Aerospace Center). 2011. TerraSAR-X - Germany's radar eye in space. [Verkköjulkaisu]. Saatavissa: http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10377/565_read-436/#gallery/350. [Viitattu 22.8.2013].
- Franco-Lopez, H., Ek, A.R. & Bauer, M.E. 2001. Estimation and mapping of forest density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251–274.
- Gama, F.F., dos Santos, J.R. & Mura, J.C. 2010. Eucalyptus Biomass and Volume Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR Data. *Remote Sensing* 2: 939–956.
- Hollaus, M., Wagner, W., Maier, B., & Schadauer, K. 2007. Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. *Sensors* 7: 1559–1577.
- Holmström, H. & Fransson, J.E.S. 2003. Combining remotely sensed optical and radar data in kNN-estimation of forest variables. *Forest Science* 49: 409–418.

Holopainen, M., Tuominen, S., Karjalainen, M., Hyypä, J., Hyypä, H., Vastaranta, M., Hujala, T. & Tokola, T. 2009. Korkearesoluutioisten E-SAR-tutkakuvien tarkkuus puustotunnusten koealatason estimoinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 309–323.

Holopainen, M., Haapanen, R., Karjalainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J., Yu, X., Tuominen, S. & Hyypä, H. 2010. Comparing Accuracy of Airborne Laser Scanning and TerraSAR-X Radar Images in the Estimation of Plot-Level Forest Variables. *Remote Sensing* 2: 432–445.

Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D. & Levine, E. 2007. Exploring LiDAR–RaDAR synergy — predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR. *Remote Sensing of Environment* 106: 28–38.

Hyypä, H. & Hyypä, J. 2001. Effects of Stand Size on the Accuracy of Remote Sensing-Based Forest Inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(12): 2613–2621.

Hyypä, H., Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Kaasalainen, S., Honkavaara, E. & Rönholm, P. 2005. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”*.

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

Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y-H. 2000a. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128: 109–120.

Hyypä, J., Pyysalo, U., Hyypä, H., Haggren, H., & Ruppert, G. 2000b. Accuracy of laser scanning for DTM generation in forested areas. *Proceedings of SPIE 4035 Laser Radar Technology and Applications V*: 119–130.

Imhoff, M.L. 1995. Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramifications for Global Biomass Inventory. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 511–518.

Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013. Retrieval of forest aboveground biomass and stem volume with airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 5: 2257–2274.

Kantola, T., Vastaranta, M., Yu, X., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Talvitie, M., Kaasalainen, S., Solberg, S. & Hyypä, J. 2010. Classification of defoliated trees using tree-level airborne laser scanning data combined with aerial images. *Remote Sensing* 2(12): 2665–2679.

Kantola, T., Vastaranta, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Talvitie, M. & Hyypä, J. 2013. Classification of Needle Loss of Individual Scots Pine Trees by Means of Airborne Laser Scanning. *Forests* 4: 386–403.

Karjalainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2012. Prediction of plot-level forest variables using TerraSAR-X stereo SAR data. *Remote Sensing of Environment* 117: 338–347.

Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J.A., Hunsaker, C., Vona, J. & Clutter, M. 2004. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment* 93: 339–358.

Kraus, K. & Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53: 193–203.

Laamanen, R. & Kangas, A. 2001. Large-Scale Forest Owner's Information Needs in Operational Planning of Timber Harvesting – Some Practical Views in Metsähallitus, Finnish State-Owned Enterprise. *Silva Fennica* 45(4): 711–727.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communications Institute Forestalis Fenniae* 108. 74 s.

Leppänen, V.J., Tokola, T., Maltamo, M., Mehtätalo, L., Pusa, T. & Mustonen, J. 2008. Automatic delineation of forest stands from LiDAR data. Conference presentation in *GEOBIA 2008 – Pixels, Objects, Intelligence: GEOgraphic Object-Based Image Analysis for the 21st Century*. 6 s.

Le Toan, T., Beaudoin, A., Riom, J. & Guyon, D. 1992. Relating Forest Biomass to SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(2): 403–411.

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* 84(1): 23–31.

Metsäntutkimuslaitos. 2010. Monilähteinen VMI. [Verkkójulkaisu]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/vmi-moni.htm>. [Viitattu 12.9.2013].

Metsätilastollinen vuosikirja 2011. Metsäntutkimuslaitos. s. 76.

Moeur, M. & Stage, A.R. 1995. Most Similar Neighbor: An Improved Sampling Inference Procedure for Natural Resource Planning. *Forest Science* 41(2): 337–359.

Mora, B., Wulder, M.A., White, J.C. & Hobart, G. 2013. Modeling stand height, volume, and biomass from very high spatial resolution satellite imagery and samples of airborne LiDAR. *Remote Sensing* 5(5): 2308–2326.

Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 29. 169 s.

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: 88–99.

- Nyysönen, A. & Mielikäinen, K. 1982. Metsikön kasvun arviointi. *Acta Forestalia Fennica* 163. 48 s.
- 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: 328–341.
- Perko, R., Raggam, H., Deutscher, J., Gutjahr, K. & Schardt, M. 2011. Forest Assessment Using High Resolution SAR Data in X-Band. *Remote Sensing* 3: 792–815.
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J., Pitkänen, J. & Packalén, P. 2007. Preharvest Measurement of Marked Stands Using Airborne Laser Scanning. *Forest Science* 53(6): 653–661.
- Repola, J. 2008. Biomass Equations for Birch in Finland. *Silva Fennica* 42(4): 605–624.
- Repola, J. 2009. Biomass Equations for Scots Pine and Norway Spruce in Finland. *Silva Fennica* 43(4): 625–647.
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E. & Carson W.W. 2003. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 527–535.
- Santoro, M., Fransson, J.E.S., Eriksson, L.E.B., Magnusson, M., Ulander, L.M.H. & Olsson, H. 2009. Signatures of ALOS PALSAR L-Band Backscatter in Swedish Forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(12): 4001–4019.
- Solberg, S., Astrup, R., Gobakken, T., Næsset, E. & Weydahl, D.J. 2010. Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR. *Remote Sensing of Environment* 114: 2353–2360.

Solberg, S., Astrup, R., Breidenbach, J., Nilsen, B. & Weydahl, D. 2013. Monitoring spruce volume and biomass with InSAR data from TanDEM-X. *Remote Sensing of Environment* 139: 60–67.

Soininen, A. 1998–2011. TerraScan User's Guide. [Verkkodokumentti]. Terrasolid. Saatavissa: [http://www.terrasolid.fi/en/users_guide/terrascan_users_guide]. s. 246. [Viitattu 18.6.2013].

Tuominen, S. & Haakana, M. 2005. Landsat TM Imagery and High Altitude Aerial Photographs in Estimation of Forest Characteristics. *Silva Fennica* 39(4): 573–584.

Tuominen, S. & Haapanen, R. 2013. Estimation of forest biomass by means of genetic algorithm-based optimization of airborne laser scanning and digital aerial photograph features. *Silva Fennica* 47 (1). 20 s.

Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J., Kaasalainen, S. & Hyypä, H. 2012a. SAR radargrammetry and scanning LiDAR in predicting forest canopy height. 32nd IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2012.

Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2012b. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67: 73–79.

Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J. & Kaasalainen, S. 2013. TerraSAR-X Stereo Radargrammetry and Airborne Scanning LiDAR Height Metrics in Imputation of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Article in press.

Wulder, M.A., White, J.C., Nelson, R.F., Næsset, E., Ørka, H.O., Coops, N.C., Hilker, T., Bater, C.W. & Gobakken, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment* 121: 196–209.

LIITTEET

Liite 1. ALS-malliin valitut selittävät muuttujat.

Lyhenne (ArboLiDAR)	Selitys
L_ZP_VD^2	Kasvillisuuden tiheyttä kuvaava tunnus, joka kertoo vähintään 2 metrin korkeudelta tulleiden havaintojen osuuden suhteessa kaikkien havaintojen määrään. Mallissa ko. tunnus on korotettu toiseen potenssiin.
L_L30M_7_30	Enintään 7 metrin korkeudelta tulleiden viimeisten kaikujen osuus suhteessa kaikkiin viimeisiin kaikiuihin.
L_FZ2_ZP30	Sellaisen havainnon korkeus, jossa nousevasti järjestettyjen pisteiden korkeusarvojen kumulatiivinen summa on lähimpänä 30 % korkeusarvojen kokonaissummasta. Tunnuksessa on huomioitu ensimmäiset (first) ja ainoat (only) kaiut, ja alle 2 metrin korkeudelta tulleet havainnot on leikattu pois.
L_LZ2_ZP40	Sellaisen havainnon korkeus, jossa nousevasti järjestettyjen pisteiden korkeusarvojen kumulatiivinen summa on lähimpänä 40 % korkeusarvojen kokonaissummasta. Tunnuksessa on huomioitu viimeiset (last) ja ainoat (only) kaiut, ja alle 2 metrin korkeudelta tulleet havainnot on leikattu pois.
L_LZ2_ZMAX^2	Viimeisten (last) ja ainoiden (only) kaikujen maksimikorkeus korotettuna toiseen potenssiin.

Liite 2. SAR-malliin valitut selittävät muuttujat.

Lyhenne (ArboLiDAR)	Selitys
R_L27M_16	Enintään 13,5 metrin korkeudelta havaittujen vastinpisteiden osuus suhteessa kaikkiin vastinpisteisiin.
R_L30M_5_29	Enintään 5 metrin korkeudelta havaittujen vastinpisteiden osuus suhteessa kaikkiin vastinpisteisiin.
R_FZ05_ZP20	Sellaisen havainnon korkeus, jossa nousevasti järjestettyjen pisteiden korkeusarvojen kumulatiivinen summa on lähimpänä 20 % korkeusarvojen kokonaissummasta. Alle 0,5 metrin korkeudelta tulleet havainnot on leikattu pois.
R_FZ2_ZP40	Sellaisen havainnon korkeus, jossa nousevasti järjestettyjen pisteiden korkeusarvojen kumulatiivinen summa on lähimpänä 40 % korkeusarvojen kokonaissummasta. Alle 2 metrin korkeudelta tulleet havainnot on leikattu pois.
R_FZ2_PC10	Enintään 10 metrin korkeudelta havaittujen vastinpisteiden osuus suhteessa kaikkiin vastinpisteisiin. Alle 2 metrin korkeudelta tulleet havainnot on leikattu pois.