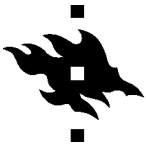


**PUUSTOBIOMASSAN ENNUSTAMINEN
HARVAPULSSISELLA
LENTOLASERKEILAUSAINEISTOLLA**

Aapo Lindberg
Maisterintutkielma

Helsingin Yliopisto
Metsätieteiden laitos
Metsävaratiede- ja teknologia
Toukokuu 2016



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution – Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Metsätieteiden laitos	
Tekijä/Författare – Author			
Aapo Lindberg			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Puustobiomassan ennustaminen harvapulssisella lentolaserkeilausaineistolla			
Oppiaine / Läroämne – Subject			
Metsävaratiede- ja teknologia			
Työn laji/Arbetets art – Level		Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
Maisterin tutkielma		Toukokuu 2016	41 sivua
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Viime aikoina asetetut tavoitteet puun energiakäytön lisäämiseksi ovat luoneet tarpeen kehittää uusia kaukokartoitukseen perustuvia inventointimenetelmiä energiapuun kartoitukseen. Laserkeilaus on kaukokartoitusmenetelmä, jota käytetään laajojen alueiden metsän inventoinneissa. Tähän asti laserkeilausta on käytetty pääasiassa tuottamaan tietoa puutavaralajeista. Energiapuun kartoitusta käsitelleet tutkimukset ovat tutkineet tarkkuutta pääasiassa koelatasolla.</p> <p>Tässä tutkielmassa tarkasteltiin aluepohjaisella laserkeilausinventoinnilla ennustettujen energiapuun määrää kuvaavien tunnusten tarkkuutta kuviotasolla. Laserkeilausaineistosta ennustettiin tilavuusestimaatit kahdella eri tavalla, käyttäen pisteaineistoa ja maanpintamallia. Estimaatit laskettiin puuston kokonaistilavuudelle ja puutavaralajien tilavuuksille. Lisäksi laskettiin biomassaestimaatit puun koko maanpäälliselle biomassalle, runkopuun biomassalle, latvusbiomassalle ja kantobiomassalle. Saatuja estimaatteja verrattiin maastomittauksiin ja monilähteen valtakunnan metsien inventoinnin tuottamiin estimaatteihin samalla alueella.</p> <p>Kahdesta ennustamisesta käytetystä menetelmästä todettiin pistepilven käyttö latvusmallin käyttöä tarkemmaksi menetelmäksi. Pistepilveä käyttäen tuotettujen tärkeimpien biomassaeestimattien tarkkuus (suhteellinen RMSE) oli hukkapuulle 37,4 %, latvusbiomassalle 21,8 % ja kantobiomassalle 18,6 %. Tuloste perusteella energiapuun kartoituksessa laserkeilausaineistolta päästiin suurin piirtein samaan tarkkuuteen kuvioittaisella arvioinnilla.</p> <p>Tässä tutkielmassa tarkasteltiin ainoastaan energiapuuksi kelpaavan puuston määrää kuviotasolla. Tutkielmassa ei pyritty etsimään energiapuun korjaamiseen soveltuvia kohteita tai määrittämään toimenpidetarpeita. Jotta energiapuun kartoittaminen laserkeilausaineistolta palvelisi metsäteollisuuden energiapuuhankintaa, tulisi jatkossa kehittää menetelmiä, joilla maastosta löydetään energiapuunkorjaukseen soveltuvat kohteet.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
laserkeilaus, biomassa, kaukokartoitus, energiapuu			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Forest Sciences	
Tekijä/Författare – Author			
Aapo Lindberg			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Estimating tree biomass using sparse density airborne LiDAR data			
Oppiaine /Läroämne – Subject			
Forest Resource Science and Technology			
Työn laji/Arbetets art – Level		Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
Master's Thesis		May 2016	41 pages
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>In recent years objectives to increase fuelwood usage have created a need to develop new remote sensing based methods to map fuelwood reserves. Laser scanning (LiDAR) is a remote sensing method which has been used in traditional forest inventories on large forest areas. These inventories have mainly concentrated on the stem volume instead of the total tree biomass. Former studies concerning fuelwood inventory accuracy have been made on a sample plot level.</p> <p>The aim of this study was to determine the precision of LiDAR based fuelwood inventory on a forest stand level. Wood stem volume and biomass estimates were produced by using two different methods: point cloud and digital terrain model. The estimates were compared with field inventory results and results from the multi-source National Forest Inventory.</p> <p>Of the two compared methods the point cloud method was found to be more accurate than the method based on digital terrain model. When the point cloud was used, the accuracy (RMSE %) of the most important fuelwood estimates were following: waste wood volume 37.4 %, branch biomass 21.8 % and stump biomass 18.6 %. The study indicates that results got by laser scanning are on similar level as results got with traditional standwise inventory.</p> <p>This study concentrated only to predict the amount of fuelwood on the forest stand level. The suitability of the stand for fuelwood harvesting was not estimated. In order to utilize LiDAR-based fuelwood inventory for wood acquisition in forest industry, methods to estimate the suitability of the stand for harvesting need to be developed.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
laser scanning, biomass, remote sensing, fuelwood			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Metsävarojen kaukokartoitusmenetelmät	6
1.2.1	Ilmakuvat ja kuvioittainen arviointi	7
1.2.2	Optisen alueen satelliittikuvat	8
1.2.3	Laserkeilaus	10
1.2.4	Muut kaukokartoitusmenetelmät	13
1.2.5	Valtakunnan metsien inventointi	13
2	AINEISTO JA MENETELMÄT	15
2.1	Tutkimusalue	15
2.2	Laserkeilausaineisto	16
2.3	Maastokoealat	16
2.4	Koeala- ja kuviotunnusten laskenta	18
2.5	Kuvioittaisen metsävaratiedon estimointi	20
2.5.1	Laserpisteaineiston esikäsittely	20
2.5.2	Piirteiden irrotus koealoille	21
2.5.3	Piirteiden irrotus hilan soluille	22
2.5.4	Piirteiden valinta ja metsävaratiedon ennustaminen hilalle	22
2.5.5	Metsävaratiedon laskenta kuvioille	23
2.5.6	Metsävaratiedon estimointi latvusmallilta	23
2.6	Tarkkuuden arviointi	23
3	TULOKSET	25
3.1	Piirrevalinta	25
3.2	Lähimpien naapurien määrän vaikutus tilavuus- ja biomassaeestimaatteihin	27
3.3	Tilavuusestimaattien tarkkuus	28
3.4	Puutavaralajien tilavuusestimaattien tarkkuus	30
3.5	Biomassaeestimaattien tarkkuus	34
4	TULOSTEN TARKASTELO	37
4.1	Tulosten tarkastelusta	37
4.2	Tilavuusestimaatti	37
4.2.1	Puutavaralajiestimaatit	39
4.3	Biomassaeestimaatit	40
4.4	Mahdollisia virhelähteitä	42
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	43
	LÄHTEET	44

TUTKIELMASSA KÄYTETTYJÄ LYHENTEITÄ

RMSE	Root mean square error, keskineliövirheen neliöjuuri
DSM	Digital surface model, digitaalinen pintamalli
DTM	Digital terrain model, digitaalinen maanpintamalli
CHM	Canopy height model, puuston korkeusmalli
VMI	Valtakunnan metsien inventointi
MVMI	Valtakunnan metsien inventoinnin monilähdeinventointi

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Osana Euroopan Unionin ilmasto- ja energiapolitiikkaa, Suomi on sitoutunut lisäämään uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossaan 38 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi Suomi on ottanut tavoitteeksi nostaa hakkeella tuotetun lämmön ja sähkön käytön 25 terawattituntiin vuodessa. Tämä tarkoittaa hakkeen käytön määrien yli kaksinkertaistamista vuoden 2009 tasosta. Eniten puuenergian käyttöä voidaan lisätä kasvattamalla nuorten metsien ja ensiharvennuksilta korjattavan energiapuun määrää. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010)

Bioenergian käytön lisääminen edellyttää bioenergiavarojen entistä tarkempaa kartoitusta ja seurantaa, mikä käytännössä tarkoittaa luotettavaa kuviotason tietoa. Perinteinen tapa hankkia metsävaratietoa ovat olleet erilaiset maastomittauksiin perustavat inventoinnit. Maastomittausten tekeminen on kuitenkin monesti kallista ja aikaa vievää, joten niitä on pyritty korvaamaan erilaisten kaukokartoitukseen perustuvien menetelmien avulla. Suurin osa näistä menetelmistä on perustunut satelliittikuva-aineistojen tulkintaan (Tomppo 1990, Franco-Lopez ym. 2001, McRoberts & Tomppo 2007). Menetelmien avulla on saatu luotettavaa metsävaratietoa laajoilta alueilta, kuten Metsäkeskuksen alueilta tai kuntatasolla. Tarkkuus ei kuitenkaan ole ollut riittävä operatiivisen tason suunnitteluun.

Laserkeilaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jonka avulla saadaan kolmiulotteista tietoa havainnoitavasta kohteesta. Laserkeilauksen käyttöä metsien inventoinnissa on tutkittu 1990-luvulta saakka. Sen avulla on pystytty luotettavasti ennustamaan puustotunnuksia kuvio- ja koealatasolla. Pääpaino tutkimuksissa ja käytännön sovelluksissa on ollut puutavaralajien tilavuuden ennustamisessa.

Tämän Pro Gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää millä tarkkuudella puuston bioenergiavaroja kuvaavia tunnuksia on mahdollista kartoittaa käyttäen Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa. Tarkkuuden tarkastelu tehdään kuviotasolla. Tavoitteena on luoda pohja laajemmalle menetelmälle, jota voitaisiin käyttää myös käytännössä bioenergian kartoitukseen.

Tutkielman tärkein tutkimuskysymys voidaan muotoilla seuraavasti: Mikä on aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin tarkkuus energiapuunkartoituksessa kuviotasolla? Tarkoituksena on siis selvittää onko tarkkuus riittävä, jotta menetelmää voitaisiin käyttää operatiivisessa bioenergiakohteiden kartoituksessa.

Tutkielma liittyy Tekesin rahoittamaan Sustainable Bioenergy Solutions for Tomorrow -tutkimusohjelmaan. Tutkimusohjelman tavoitteena on kehittää suomalaista bioenergialiiketoimintaa ja siihen liittyvää osaamista. Helsingin Yliopiston ja Geodeettisen laitoksen tehtävänä tutkimusohjelmassa on kehittää kustannustehokas tapa energiapuun kartoitukseen ja seurantaan.

1.2 Metsävarojen kaukokartoitusmenetelmät

Koska luonnonvarojen mittaaminen maastoinventoinneilla on monesti kallista ja aikaa vievää, on maastomittauksia jo pitkään pyritty vähentämään erilaisten kaukokartoitusmenetelmien avulla. Menetelmien leviämistä laajempaan käyttöön on kuitenkin hidastanut kaukokartoitusaineistojen korkea hinta ja heikko saatavuus. Kaukokartoituksen avulla saatu metsävaratieto on myös usein ollut paikkatiedoltaan epätarkkaa ja virheet varsinkin pienalueilla ovat olleet suuria. Näin ollen kaukokartoituksen käyttö etenkin operatiivisen tason metsäsuunnittelussa ei ole ollut mahdollista.

Kaukokartoitusmenetelmät voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Passiiviset menetelmät perustuvat havainnoitavan kohteen itsensä lähettämän tai heijastaman sähkömagneettisäteilyn havainnointiin. Useimmiten havainnoitava säteily on joko kohteen heijastamaa auringon säteilyä tai kohteen itsensä tuottamaa lämpösäteilyä. Yleisesti metsien inventointiin käytetyistä kaukokartoitusmenetelmistä ilma- ja satelliittikuvat perustuvat passiivisiin menetelmiin.

Aktiiviset menetelmät poikkeavat passiivisista siten, että havainnoitava säteily tuotetaan havainnointia varten ja lähetetään havainnoitavaan kohteeseen. Metsän kaukokartoitukseen käytetyistä menetelmistä aktiivisia kaukokartoitusmenetelmiä ovat laserkeilaus ja erilaiset tutkat.

1.2.1 Ilmakuvat ja kuvioittainen arviointi

Ensimmäinen laajemmalle levinnyt metsien kaukokartoitusmenetelmä oli lentokoneesta tai helikopterista otettujen ilmakuvien käyttö metsäsuunnittelun ennakkokuvioinnissa. Vaikka menetelmä ei suoraan tuottanut metsävaratietoa, vähensi se kuviointiin maastossa käytettyä aikaa merkittävästi. Operatiivisen metsäsuunnittelun valtamenetelmä ilmakuvien käytöstä tuli 1970-luvun loppupuolella metsien alueellisen suunnittelun ja ilmakuvausten organisoimisen myötä (Poso 1983). Menetelmä on säilynyt käytössä pitkään ja vasta aivan viime vuosina aluepohjaiseen laserkeilaustulkintaan perustuva menetelmä on osin korvannut sen käyttöä metsävaratiedon keruussa ja metsäsuunnittelussa.

Kuvioittaisen inventoinnin tarkkuusarviot ovat vaihdelleet suuresti eri tutkimusten välillä. Poson (1983) vuonna 1983 tekemä tutkimus oli ensimmäinen laajempi kuvioittaisen arvioinnin tarkkuutta tarkastellut tutkimus Suomessa. Tutkimuksessa tarkkuuden todettiin vaihtelevan huomattavasti eri alueilla ja myös eri mittaajien välillä. Puuston tilavuuden estimaatin keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) vaihteli tutkimuksessa 36,0–66,0 m³/ha välillä, arvioitavasta kuviosta ja arvioijasta riippuen. Laasasenahon ja Päivisen (1986) kolme vuotta myöhemmin tehdyssä tutkimuksessa tilavuuden estimaatin RMSE:n arvoksi saatiin 32,0–37,0 m³/ha ja suhteelliseksi keskivirheeksi 17,0–24,0 %.

Myös uudemmissa tutkimuksissa kuvioittaisen arvioinnin keskivirheet ovat olleet samaa luokkaa. Hyyppä ym. (2000) tutkivat Kalkkisissa eri kaukokartoitusmenetelmiä ja vertasivat niiden tarkkuutta kuvioittaiseen arviointiin ja tarkkoihin maastomittauksiin. Tutkimuksessa kuvioittaisen arvioinnin keskivirheeksi saatiin 41,0 m³/ha. Haara ja Korhonen (2004) tutkivat puusto-ositteisiin perustuvan SOLMU-inventoinnin tarkkuutta. Heidän tutkimuksessa kuvion keskitilavuuden RMSE:ksi saatiin 37,5 m³/ha ja harhaksi 2,4 m³/ha. Suhteellisen keskivirheen vastaavat arvot olivat 24,8 % ja 1,6 %.

Numeeristen ilmakuvien yleistyttyä 1990-luvun lopulla, tutkittiin jonkin verran niiden käyttöä kuvatulkinnessa. Numeeristen ilmakuvien käyttö ei kuitenkaan ole yleistynyt kuvatulkinnessa. Tulkintaa on tehty pääasiassa käyttäen ilmakuvia edullisempia satelliittikuvia tai estimointitarkkuudeltaan tarkempaa lentokoneesta keilattua laserkeilausaineistoa.

1.2.2 Optisen alueen satelliittikuvat

Ensimmäinen luonnonvarojen kaukokartoitukseen suunniteltu satelliitti oli yhdysvaltalainen Landsat, joka aloitti toimintansa vuonna 1972. Landsatin tuottamaa tietoa on käytetty laajalti erilaisiin ympäristön kaukokartoitushankkeissa. Suomessa esimerkiksi valtakunnan metsien inventoinnin monilähdeinventointi perustuu suurimmaksi osaksi Landsatin ottamiin kuviin. Landsatin jälkeen avaruuteen on lähetetty myös useita muita luonnonvarojen kartoitukseen käytettäviä satelliitteja. Metsien kartoituksessa käytetyimpiä näistä ovat olleet ranskalainen SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) ja intialainen IRS (Indian Remote Sensing).

Satelliittikuvien etuina on mahdollisuus tuottaa nopeasti ja edullisesti ajantasaista tietoa laajoilta alueilta. Aineisto on käyttäjälleen yleensä edullista tai ilmaista. Huonoina puolina voidaan pitää kuvauksen riippuvuutta valaistusolosuhteista ja pilvisyydestä. Satelliittikuvat eivät myöskään karkean resoluutionsa vuoksi tuota riittävän tarkkaa tietoa operatiivisen suunnittelun tarpeisiin.

Satelliittikuvien käyttöä metsien inventoinnissa on tutkittu aktiivisesti satelliittien olemassaoloajan. Etenkin Landsat-kuvien käytöstä on runsaasti tutkimuksia 1980-luvun lopulta lähtien. Valtamenetelmäksi metsien inventoinnissa satelliittikuvilta on etenkin Pohjoismaissa noussut Erkki Tompon (1990) kehittämä menetelmä, jossa koko inventointialueelle saadaan laskettua tiedot vertaamalla maastossa mitattujen koealojen satelliittikuvapiirteitä koealojen väliin jäävien alueiden piirteisiin. Koealojen välisille alueille etsitään maastokoealojen joukosta satelliittikuvapiirteiltään eniten samankaltaiset maastokoealat, joita kutsutaan lähimmiksi naapureiksi. Välialueiden tiedot saadaan painotettuina keskiarvoina lähimpien naapureiden puustotiedoista. Menetelmä kehitettiin parantamaan valtakunnan metsien inventoinnin tarkkuutta pienalueilla ja on

käytössä edelleen. Menetelmästä tunnetaan k:n lähimmän naapurin menetelmänä ja siitä käytetään lyhennettä k-NN.

Satelliittikuvatulkinnan tarkkuutta on tutkittu useaan eri otteeseen. Tutkimuksissa on todettu tulkinnan olevan tarkkaa kuntatasolla ja sitä laajemmilla alueilla. Kuvio- ja koealatasolla keskivirheet ovat sen sijaan olleet suuria. Suurin osa tutkimuksista on keskittynyt puuston runkotilavuuden arviointiin.

Tuominen ja Haakana (2005) tutkivat Padasjoella k-NN -menetelmällä tuotetun satelliittikuvatulkinnan tarkkuutta koealatasolla. Aineistona tutkimuksessa oli Landsat 7 -satelliittikuvien kuusi kanavaa. Puuston tilavuuden estimaatin RMSE:ksi saatiin 101,9 m³/ha ja harhaksi -3,7 m³/ha. Suhteellinen RMSE oli 74,5 %.

Hyypän ym. (2000) usean eri kaukokartoitusmenetelmän vertailussa oli mukana Landsatin lisäksi ranskalainen SPOT-satelliitti. Tarkkuutta tarkasteltiin kuviotasolla. Landsatilta tehdyn kuvatulkinnan keskivirheeksi tilavuuden estimoinnissa saatiin tuolloin 87,5 m³/ha ja suhteelliseksi keskivirheeksi 56,0 %. SPOT:n keskivirhe oli aavistuksen pienempi 78,9 m³/ha ja 50 %. Holmgren ym. (2000) tutkivat niin ikään tarkkuutta kuviotasolla. Tutkimus tehtiin Länsi-Ruotsissa kuviolla, joiden keskipinta-ala oli 19 hehtaaria. Ilman lisätietoa tehtyjen estimointien suhteellinen keskivirhe tilavuuden estimaatille oli tuolloin 36,0 %. Kuvioiden suuri koko selittää osaltaan muista tutkimuksista pienempää suhteellista keskivirhettä.

Biomassaan keskittyviä tutkimuksia optisen aallonpituusalueen satelliittikuvainventoinnista on melko vähän. Biomassan arviointi on yleensä tehty käyttämällä kertoimia puun runkotilavuuden estimaatille (Lehtonen, ym. 2004, Muukkonen & Heiskanen 2005). Suurin osa biomassan estimointiin keskittyvistä tutkimuksista on keskittynyt laajojen alueiden inventointiin (Tomppo, ym. 2002, Rosenqvist, ym. 2003, Muukkonen & Heiskanen 2005).

Tomppo ym. (2002) tutkivat keski- ja korkearesoluutioisten satelliittikuvien yhdistämistä biomassan ja runkotilavuuden estimoinnissa Ruotsin Västerbottenissa ja Suomen Pohjanmaalla. Tutkimuksessa käytettiin Landsat ja IRS-1C WiFS -dataa. Koeala-

kohtaiseksi estimaatin suhteelliseksi keskivirheeksi saatiin maanpäälliselle biomassalle 53,4 % ja harhaksi 0,1 m³/ha. Runkotilavuuden estimaatille vastaavat arvot olivat 59,0 % ja -0,1 m³/ha.

Muukkonen ja Heiskanen (2005) tutkivat biomassan kartoitusta ASTER-satelliitin dataa ja kuviotason maastotietoa. Tutkimus tehtiin Etelä-Suomessa Evon ja Vesijaon alueilla Lammilla ja Padasjoella. Saatuja tuloksia verrattiin valtakunnan metsien inventoinnin tuloksiin. Biomassan laskentaan käytettiin biomassakerrointa. Estimaattien ennustamiseen käytettiin regressiomalleja ja neuroverkkoja. Regressiomalleja käyttämällä suhteellinen keskivirhe puuston maanpäälliselle biomassalle oli 39,5 % harhan ollessa -10,9 %. Runkotilavuudelle vastaavat arvot olivat 44,8 % ja -17,8 %. Neuroverkkoja käyttämällä päästiin hieman parempiin tuloksiin, jolloin maanpäällisen biomassan arvot olivat 36,7 % keskivirheelle sekä -8,6 % harhalle ja tilavuuden 44,6 % ja -6,3 %. Estimaatit biomassasta laskettiin myös muille puun osille.

Tuominen ym. (2010) tutkivat biomassan estimointia silloisen Keski-Suomen Metsäkeskuksen alueella. Toisin kuin aiemmissa tutkimuksissa biomassojen laskennassa käytettiin Repolan (2008, 2009) biomassayhtälöitä. Ennustaminen tehtiin k:n lähimmän naapurin menetelmällä erikseen kivennäis- ja turvemaille sekä eri satelliittikuvan ruuduille. Ennustamisen tarkkuutta tarkasteltiin koealatasolla. Maanpäällisen biomassan estimaatin tarkkuus oli parhaimmassa estimaatissa 65,1 % ja harha -0,4 %. Maanalaiselle biomassalle vastaavat arvot olivat 59,7 % ja -0,5 %. Biomassaestimaatit laskettiin lisäksi erikseen puun muille osille.

1.2.3 Laserkeilaus

Laserkeilaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jossa lasersäteilyä lähettävällä ja vastaanottavalla laitteella, laserkeilaimella, havainnoidaan lasersäteilyn heijastumista tarkasteltavasta kohteesta. Ilmasta tehtävää laserkeilausta kutsutaan yleisesti lento- tai ilmalaserkeilaukseksi (engl. Airborne Laser Scanning, ALS) (Holopainen ym, 2013).

Laserkeilain koostuu kahdesta osasta, havainnoitavaan kohteeseen laserpulssin lähettävästä lasertykistä sekä heijastuneen pulssin havainnoivasta ja tulkitsevasta vastaanottimesta. ALS-sovelluksissa laserkeilaimen yhteyteen on liitetty sijaintitietoa mittaava GNSS-vastaanotin sekä inertian mittaussyksikkö (IMU), jota käytetään lentokoneen asennon mittaamiseen. GNSS-vastaanottimen tuottaman sijaintitiedon ja inertia mittaussyksikön tuottaman tiedon avulla voidaan kullekin paluukaiulle laskea sen sijainti kolmiulotteisessa avaruudessa. Yhdistämällä kaikkien paluukaikujen sijaintitiedot yhteen saadaan muodostettua havainnoitavaa kohdetta kuvaava kolmiulotteinen pistepilvi. Ilmasta tehtävässä laserkeilauksessa laserkeilain on liitetty lentokoneeseen tai helikopteriin. Keilaus tehdään yleensä 400–4000 metrin korkeudelta maanpinnasta, jolloin pulssitiheys maan pinnalla on 0,5–20 pulssia/m².

Laserkeilauksen etuina voidaan pitää aineiston tarkkuutta ja sen tuottaman tiedon kolmiulotteisuutta. Tiedon kolmiulotteisuuden vuoksi puuston pituuksia voidaan ennustaa kaksiulotteisia aineistoja huomattavasti paremmin. Menetelmä ei ole satelliittikuvien tapaan yhtä altis pilvisyyden ja valaistusolosuhteiden vaikutukselle. Aineisto ei myöskään ole samaan tapaan altis saturoitumiselle kuin satelliittikuva-aineisto. Aineiston huonoina puolina voidaan pitää kuvauksen työläyttä ja kalleutta erittäin laajoilla alueilla satelliittikuviin verrattuna.

Maamittauslaitos on laatimassa koko Suomen alueelle uutta korkeusmallia laserkeilausaineiston pohjalta. Tämän vuoksi Suomesta on tällä hetkellä saatavilla ajantasaista ja käyttäjälleen ilmaista laserkeilausaineistoa. Vuonna 2008 aloitetun koko Suomen kattavan laserkeilauksen on määrä olla valmis vuoden 2019 loppuun mennessä. Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa pyritään käyttämään entistä tehokkaammin myös Suomen metsäkeskuksen laserkeilaustulkintaan ja kohdennettuun maastoinventointiin perustuvassa metsävaratiedonkeruussa. Aiemmin Metsäkeskus on hankkinut laserkeilausaineistonsa itse.

Ensimmäiset tutkimukset laserkeilauksen hyödyntämisestä metsien inventoinnissa tehtiin 1990-loppupuolella. Laserkeilauksen hyödyntämiseen inventoinnissa on käytössä kaksi eri tapaa: aluepohjainen menetelmä (Næsset 1997, 2002) ja yksinpuintulkinta (Hyyppä & Inkinen 1999). Näistä aluepohjainen menetelmä on ollut selvästi käy-

tetympi niin laserkeilauksen käyttöä koskevissa tutkimuksissa kuin käytännön soveluksissakin. Aluepohjaisen menetelmän suosiota selittää pitkälti käytettävissä olleiden laserkeilausaineistojen tarkkuus. Aluepohjainen menetelmä soveltuu paremmin käytettäväksi harvapulssisen laseraineiston kanssa, kun yksinpuintulkinta vaatii toimiakseen pulssitiheydeltä tarkan matalalta lennetyn aineiston (Vastaranta ym. 2011).

Aluepohjainen menetelmä perustuu laserkeilausaineiston samantapaiseen tulkintaan kuin satelliittikuvatulkintakin. Olettamuksena on, että laserpistepilven piirteiden ja maaston puustotunnusten välillä on olemassa mallinnettavissa oleva riippuvuus. Tulkintaa varten laserpisteaineisto jaetaan ruutuihin. Ruutuja, joiden alueelta ei ole maastomittaustietoa, lasketaan tiedot maastomittaustiedon omaavilta, laserpistepiirteiltään lähinnä samankaltaisilta ruuduilta. Samankaltaisten ruutujen valinta tehdään erilaisia tilastollisia menetelmiä käyttäen, joita ovat esimerkiksi k-NN ja random forest (Breiman 2001). Yleensä piirteinä käytetään pisteiden korkeusjakaumaan liittyviä tietoja, joita ovat korkeusjakauman prosenttipisteet, maksimi- ja minimiarvot sekä korkeushajonnan arvot.

Aluepohjaisen laserkeilaustulkinnan tarkkuutta metsien inventoinnissa on tutkittu runsaasti etenkin Pohjoismaissa. Viime vuosina useimmissa tutkimuksissa on puuston tilavuuden lisäksi tutkittu myös biomassan määrää. Næsset ja Gobakken (2008) tutkivat Etelä-Norjassa aluepohjaisen menetelmän tarkkuutta biomassan estimoinnissa koealatasolla. Biomassan ennustamiseen käytettiin regressiomalleja. Tutkimuksessa huomioitiin sekä maanpäällinen että maanalainen biomassa. Maanpäällisen biomassan estimaatin RMSE oli 0,21 t/ha ja maanalaisen 0,22 t/ha. Kotamaa ym. (2009) tutkivat bioenergian kartoitusta ja metsätaloudellista päätöksen tekoa laserkeilausaineiston perusteella. Maanpäällisen biomassan estimaatin suhteellinen RMSE oli 18,9 % ja kokonaisbiomassan 19,3 %.

Tuominen ja Haapanen (2013) tutkivat biomassan ja runkotilavuuden estimointia, kun piirteiden valintaan käytettiin geneettistä algoritmia. Tutkimuksessa oli kaksi tutkimusaluetta, joista toinen sijaitsi Hämeenlinnan Lammilla ja toinen Kuopion ja Karttulan kuntien alueella. Runkotilavuuden estimaatin RMSE vaihteli 22,9–28,5 % harhan ollessa 0,4–1,4 %. Maanpäälliselle biomassalle vastaavat arvot olivat 22,1–24,8 % ja 0,1–1,3 %. Tulosten tarkkuuden tarkastelu tehtiin koealatasolla.

Kankareen ym. (2013) tutkimuksessa käytettiin yksinpuintulkinnan ja aluepohjaisen menetelmän yhdistelmää. Koealatiетоjen laskenta tehtiin k-NN -menetelmää käyttäen. Biomassan estimaatin RMSE oli 24,9 % ja runkotilavuuden 26,4 %.

1.2.4 Muut kaukokartoitusmenetelmät

Myös monien muiden kaukokartoitusmenetelmien käyttöä on tutkittu, mutta käytännön sovelluksia on ollut vähän. Hyypän ym. (2000) usean kaukokartoitusmenetelmän vertailussa parhaaksi osoittautui profiloiva tutka. Sen käyttö laajojen alueiden inventoinnissa olisi kuitenkin ollut hankalaa pienen keilausalan vuoksi. Samaan aikaan ositain samaan periaatteeseen perustuva laserkeilaustekniikka kehittyi merkittävästi ja siitä tuli valtamenetelmä puuston tarkkaan inventointiin kaukokartoituksella.

Viime aikoina tutkasatelliittikuvat ovat herättäneet mielenkiintoa etenkin laajojen alueiden inventoinnissa. Koska kuvaus tapahtuu satelliitista, on laajojenkin alueiden kuvaaminen edullista. Pohjoismaissa tutkasatelliittien käytöstä tehdyissä tutkimuksissa on tilavuuden estimaatin suhteellinen RMSE vaihdellut 30,2–44,0 % (Karjalainen ym. 2012, Solberg ym. 2013, Vastaranta ym. 2014). Biomassan estimaatin vastaavat arvot ovat olleet 29,9–43,0 % (Solberg ym. 2013, Vastaranta ym. 2014). Kuviotasolla on päästy hieman tarkempiin lukuihin, jolloin estimaatin RMSE runkotilavuudelle oli 20 % ja maanpäälliselle biomassalle 19,0 % (Solberg ym. 2013).

1.2.5 Valtakunnan metsien inventointi

Suomessa on pitkä perinne metsien inventoinnista. Koko Suomen metsävarat inventoitiin ensimmäisen kerran vuosina 1921–1924 tehdyssä ensimmäisessä valtakunnan metsien inventoinnissa. Tämän jälkeen inventointeja on jatkettu säännöllisin väliajoin siten, että vuonna 2013 saatiin päätökseen 11. inventointi. Inventointien tavoitteena on tuottaa tietoa metsävaroista, maankäytöstä, metsien terveydentilasta, monimuotoisuudesta ja hiilivaroista ja niiden muutoksista. Toistuvilla inventoinneilla saadaan seurantatietoa metsissä tapahtuneista muutoksista.

Inventointi perustuu maastomittauksiin, joita tehdään koko Suomen alueella. Maastomittausten perusteella voidaan laskea arviot metsävaroista koko maalle ja suuralueille,

kuten metsäkeskuksen alueille ja maakunnille. Pelkästään maastomittausten perusteella laskettu tieto ei kuitenkaan sisällä paikkatietoa, eikä se koelaverkon harvuuden vuoksi sovellu pienempien alueiden estimaattien laskentaan.

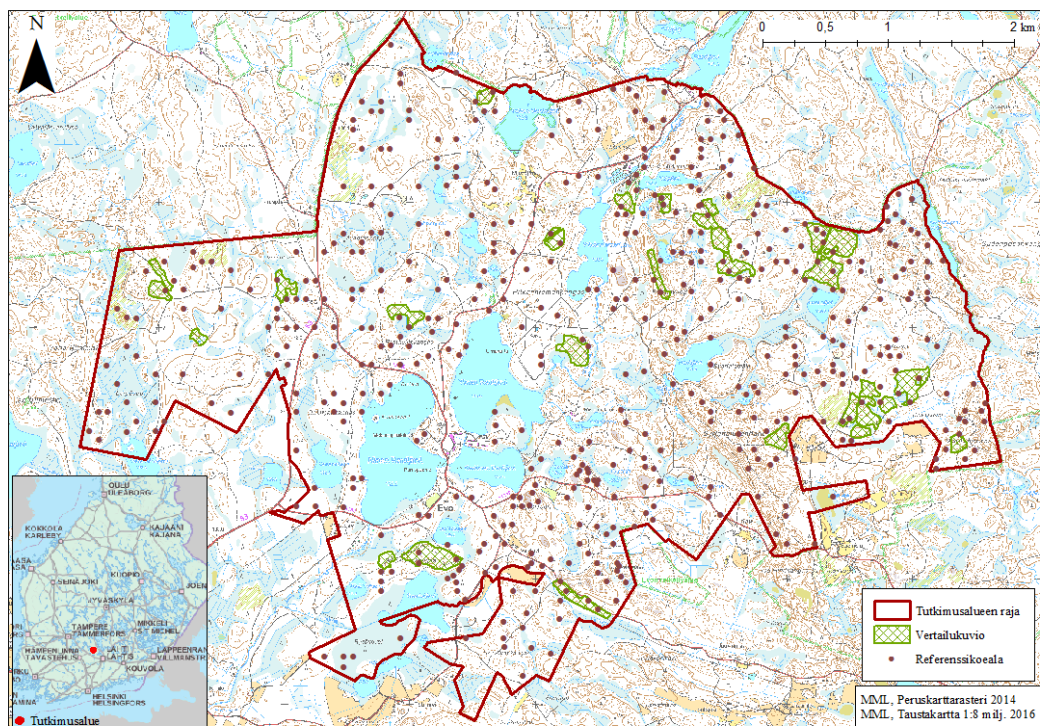
VMI8:sta lähtien on maastomittauksiin perustuvan inventointitiedon ohella tuotettu tietoa satelliittikuvapohjaisella monilähdeinventoinnilla. Monilähdeinventointi perustuu k-NN -menetelmän käyttöön. Tulkinnassa käytetään ensisijaisesti Landsat-kuvia, mutta niiden puuttuessa voidaan käyttää myös SPOT- tai IRS-kuvia. Tulevaisuudessa voidaan käyttää myös eurooppalaisen Sentinel-satelliitin kuvia. Vuoden 2012 lopulta lähtien monilähdeinventoinnilla tuotetut metsävarakartat ovat olleet vapaasti saatavissa.

2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimusalue

Noin 2000 hehtaarin laajuinen tutkimusalue sijaitsee eteläisessä Suomessa Hämeenlinnan Evolla (Kuva 1). Alue on Metsähallituksen omistama ja se toimii tällä hetkellä Hämeen Ammattikorkeakoulun metsätalouden opetusmetsänä. Se on myös osa Evon retkeilyaluetta. Evo on tyypillistä vedenjakajaseutua, jossa maaston vaihtelevuus on suurta. Alueelle osuu kaksi Maanmittauslaitoksen laserkeilausaluetta: Hämeenlinna, itä ja Vehkajärvi. Näiden molempien laserkeilausalueiden aineistoa käytettiin tutkielmassa.

Alueen metsillä on pitkä talouskäyttöhistoria, mutta toisaalta sieltä löytyy tavallista enemmän suojeltuja kohteita sekä metsiköitä, joissa retkeilyn erityistarpeet on otettu huomioon. Alueen puusto koostuu pääasiassa eri-ikäisistä mänty- ja kuusimetsistä. Kasvupaikat vaihtelevat lehdoista kuivahkoihin kankaisiin.



Kuva 1. Kartta tutkimusalueesta, maastokoealoista ja tarkastelluista kuvioista

2.2 Laserkeilausaineisto

Tutkimuksessa käytettiin avoimesti saatavilla olevaa Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa. Tutkimusalue osuu kahden eri laserkeilausprojektin alueelle. Keilauksissa on käytetty eri laserkeilaimia, joiden ominaisuudet poikkeavat hieman toisistaan. Eri keilausprojektien arvot ja niissä käytettyjen laserkeilainten ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Laserkeilausalueiden tärkeimmät kuvaustiedot (Maanmittauslaitos 2016)

Keilausalue	Vehkajärvi	Hämeenlinna, Itä
Keilain	Leica ALS50	Optech ALTM GEMINI
Korkeustarkkuus	0,15	0,15
Pulssitiheys (kpl / m2)	0,8	0,74
Lentokorkeus	2200	1830

2.3 Maastokoealat

Maastokoealoina tutkielmassa oli aineistoa vuosilta 2011, 2012 ja 2013. Vuosien 2011 ja 2012 koealat toimivat laserkeilaustulkinnan opetusaineistona. Vuoden 2013 koealaineistosta laskettiin puustotunnukset kuvioille, joita käytettiin laserkeilaustulkinnasta saatujen tulosten vertailuaineistona.

Vuosina 2011 ja 2012 mitattuja koealoja oli 711 kappaletta. Koealat oli sijoitettu edustamaan mahdollisimman hyvin erityyppisiä metsiä. Koealat olivat 9,77 m kiinteäsäteisiä ympyräkoaloja, joilta oli mitattu kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli 5 cm paksut puut. Kaikista puista oli kirjattu ylös puulaji sekä mitattu rinnankorkeusläpimitta ja puun pituus. Lisäksi koealan keskipiste oli määritetty Trimblen GNSS-vastaanottimella.

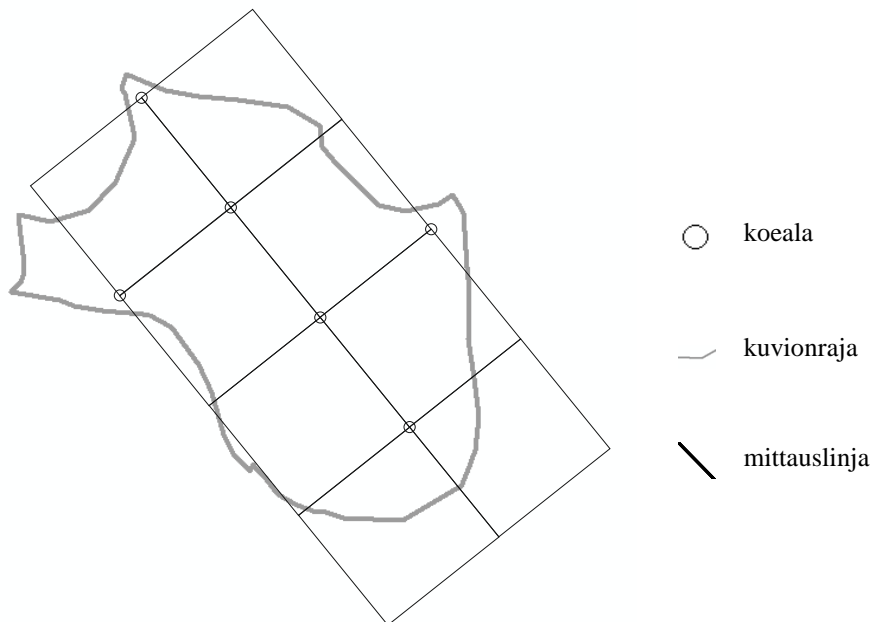
Vertailuaineistoksi tutkimukseen valittiin vanhaa metsäsuunnitelmaa ja laserkeilausaineistoa käyttäen 29 kuviota, joista 14 oli ensiharvennuskuvioita ja 15 uudistushakkuukuviota. Valinnassa metsäsuunnitelman kuviorajoja käytettiin tarkasteltavien kuvioiden rajaamiseen, jonka jälkeen kuvioiden kehitysluokat arvioitiin laserkeilausaineiston avulla. Ensiharvennus- ja päätihakkuukuvioiden käyttöön vertailuaineistona

päädyttiin, koska ne ovat bioenergian korjuulle otollisimpia kohteita. Muita ehtoja kuvioiden valinnassa oli yli hehtaarin pinta-ala ja sijainti kivennäismaalla.

Koelat sijoitettiin kuvioille käyttämällä systemaattista koelahilaa. Hila pyrittiin muodostamaan siten, että sen runkolinjaksi tuli pisin mahdollinen kuvion halki kulkeva suora. Kuvioiden epäsäännöllisen muodon vuoksi runkolinjan sijoittaminen pisimmälle kuvion halkaisevalle suoralle ei aina ollut mahdollista. Tällöin runkolinja pyrittiin sijoittamaan siten, että koelahila muodostui kuvioille mahdollisimman kattavaksi. Koelavälin laskentaan käytettiin oheista kaavaa 1, jossa koelaväli (d) saatiin laskemalla kuvion pinta-alan (A) ja tavoitellun koelamäärän (n) osamäärän neliöjuuri. Tavoiteltuna koelamääränä pidettiin viittä koelaa kuvioille.

$$d = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (1)$$

Maastoon koelat sijoitettiin mittanauhan ja bussolisuunnan avulla. Mittauksen aloituspisteeksi valittiin jokin selkeästi kartalta ja maastosta määritettävissä oleva paikka, kuten tien risteys tai kuvion kulma. Koelojen sijoittelua on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Koelat sijoitettiin mittauslinjojen leikkauspisteisiin.

Koalamittaukset poikkesivat vuosina 2011 ja 2012 mitatuista koaloista siten, että pituus mitattiin ainoastaan pituuskoepuille, joita olivat uudistuskypsissä metsiköissä joka kolmas ja ensiharvennusemetsiköissä joka viides lukupuu. Lukupuiden pituudet estimoitiin myöhemmin rinnankorkeusläpimittojen perusteella (ks. kappale 2.4).

2.4 Koala- ja kuviotunnusten laskenta

Koaloille laskettiin puutavaralajittaiset tilavuudet ja biomassat puuston eri osille, joita olivat maanpäällinen kokonaisbiomassa, runkopuun biomassa, latvusbiomassa, ja kantobiomassa. Laskennat tehtiin kullekin puulajille erikseen käyttäen puulajin omia malleja. Laskennassa käytetyt puulajit olivat mänty, kuusi sekä lehtipuut. Koalamittauksissa oli joitakin harvinaisempia puulajeja, joille ei ollut omia malleja, näitä puulajeja käsiteltiin osana muita puulajeja. Männyn kaavoilla laskettiin kaikki *Pinus*-suvun lajit, kuusen kaavoilla kaikki muut havupuut, kuten lehtikuuset ja pihdat. Kaikkien lehtipuiden laskennassa käytettiin koivun malleja.

Koska vuoden 2013 mittauksissa pituudet mitattiin ainoastaan pituuskoepuille, piti lukupuille arvioida pituudet koepuumittausten perusteella. Pituuksien laskentaan käytettiin Näslundin (1936) pituusmallia, jota kalibroimalla saatiin malli pituuksien laskentaan. Kaavassa 2 puun pituutta (h) ennustetaan puun rinnankorkeusläpimitan (d). Muuttujat a ja b ovat estimoitavia parametreja.

$$h = 1,3 + \frac{d^2}{a+bd^2} \quad (2)$$

Parametrien estimoimiseksi malli linearisoitiin kaavassa 3 esitettyyn muotoon.

$$\frac{d}{\sqrt{h-1,3}} = a + bd \quad (3)$$

Parametrien estimoinnin jälkeen malli palautettiin takaisin epälineaariseen muotoon ja korjattiin muunnoksesta syntynyt harha korjaustekijöiden avulla. Parametrien laskenta

tehtiin erikseen kullekin puulajille sekä kuvion hakkuutyypille. Saatujen pituuksien RMSE oli 1,90 metriä ja suhteellinen RMSE 13,4 %.

Koealojen kaikille lukupuille laskettiin puutavaralajittaiset tilavuudet käyttäen Laasanahon (1982) runkokäyrämalleja. Laskennassa runkokäyrältä etsittiin puutavaralajien alkamis- ja päättymiskohdat, minkä jälkeen puutavaralajien tilavuudet laskettiin pyörähdyskappaleen integraalina. Tukkien ja kuitupuiden apteraukseen käytettiin VMI11:n mittavaatimuksia (Metsäntutkimuslaitos 2009). Kannon korkeutta ei huomioitu. Biomassojen laskentaan käytettiin Repolan biomassamalleja (Repola 2008, 2009). Repolan biomassamallit ennustavat puun eri osien biomassoja rinnankorkeusläpimitan ja pituuden avulla. Kullekin puulle laskettiin biomassat seuraaville puun osille: runkopuu, kuolleet oksat, elävät oksat ja kanto. Kuolleet ja elävät oksat yhdistettiin laskennan jälkeen latvusbiomassan alle. Lisäksi laskettiin kunkin puun koko maanpäällinen biomassa.

Koealakohtaiset tilavuus- ja biomassatiedot saatiin laskemalla yhteen koealan puiden tiedot. Koealoilta puustotiedot yleistettiin koko kuvion alueelle kertomalla koealan tiedot koealan edustamalla alalla. Laskettujen puustotunnusten vaihtelu on esitetty koealojen osalta taulukossa 2 ja kuviotietojen osalta taulukossa 3.

Taulukko 2. Koealojen puustotunnusten vaihtelu

	Tilavuus m ³ /ha			Biomassa t/ha			
	Tukki	Kuitu	Hukka	Maan pääll.	Runko	Latvus	Kanto
Minimi	0,0	1,6	0,2	925,9	742,4	141,4	56,1
Maksimi	572,1	223,2	22,8	301262,6	217167,1	27268,0	19747,2
Keskiarvo	133,9	64,6	5,6	102644,2	74345,7	7302,7	6268,4
Keskihajonta	111,2	43,3	4,2	53049,4	39268,3	4044,5	3311,8

Taulukko 3. Vertailukuvioiden puustotunnusten vaihtelu

	Tilavuus m ³ /ha			Biomassa t/ha			
	Tukki	Kuitu	Hukka	Maan pääll.	Runko	Latvus	Kanto
Minimi	0,0	12,3	1,3	44728,9	27375,3	2323,1	2525,4
Maksimi	422,7	111,3	15,6	218452,4	153496,6	11674,0	13908,7
Keskiarvo	148,6	66,0	6,3	110930,6	76405,0	6630,4	6894,5
Keskihajonta	135,1	24,6	4,2	52822,4	39779,8	2445,8	3246,4

2.5 Kuvioittaisen metsävaratiedon estimointi

Metsävaratieto estimoitiin kuvioille käyttämällä aluepohjaista laserkeilaustulkintaa. Menetelmä perustuu olettamukseen siitä, että estimoitavien tunnusten ja aineistosta irrotettavien laserpistepiirteiden välillä on mallinnettavaa riippuvuutta.

Metsävaratiedon ennustaminen ja piirteiden valinta tehtiin lähimpien naapurien menetelmällä. Piirrevalintaan käytettiin random forest -menetelmää (ks. kappale 2.5.4.). Metsävaratiedon ennustaminen tehtiin käyttäen kahta erilaista lähtöaineistoa, laserpistepilveä ja latvusmallia (CHM). Metsävaratiedon estimointiprosessi oli molempia aineistoja käytettäessä pääpiirteittäin samanlainen. Tässä tutkielmassa on ensin esitelty ennustamisen vaiheet käytettäessä laserpistepilveä, jonka jälkeen luvussa 2.5.5 kerrotaan miten latvusmallilta tehty ennustaminen poikkesi laserpistepilvestä ennustamisesta.

2.5.1 Laserpisteaineiston esikäsittely

Tutkielmassa käytettiin Maanmittauslaitoksen laserpisteaineistoa. Aineistolle oli valmiiksi tehty pisteiden luokittelu, mutta tässä tutkielmassa pisteiden luokittelu tehtiin uudelleen, jolloin voitiin varmistaa, että luokittelu oli toivotun kaltainen.

Ennen luokittelua laserpisteaineisto rajattiin käsittämään ainoastaan laserpisteet, jotka kuvasivat ensimmäistä tai ainoaa heijastunutta kaikua. Lisäksi poistettiin pisteet, joiden korkeus maanpinnasta oli yli 40 tai alle 0,5 metriä. Näiden pisteiden oletettiin olevan tulkintaa häiritseviä virheitä. Seuraavaksi laserpisteet luokiteltiin maapisteisiin ja kasvillisuuspisteisiin. Kasvillisuuspisteisiin luokiteltiin ne pisteet, joiden korkeus maanpinnan tasosta oli yli kaksi metriä. Ne pisteet, jotka sijaitsivat maanpinnan tason ja kahden metrin välillä jätettiin pois tulkinnasta, koska niissä esiintyy huomattavan paljon virhepisteitä ja toisaalta tätä matalammalla puustolla ei ole energiapuunkannalta merkitystä.

Pistepilvestä laskettiin maanpintamalli (DTM) ja kasvillisuutta kuvaava pintamalli (DSM). Pintamallien muodostamisessa käytettiin solukokona 1×1 metriä. Maanpintamallin muodostamisessa kukin solu sai korkeusarvon matalimmalta sen alu-

eelta heijastuneen kaiun korkeusarvon mukaan, kun taas kasvillisuutta kuvaavan korkeusmallin luonnissa korkeusarvona käytettiin korkeimmalta heijastuneen kaiun arvoa. Maanpintamallin ja kasvillisuuden pintamallin erotuksena laskettiin puuston korkeutta kuvaava latvusmalli (CHM), jota käytettiin toisena metsävaratiedon ennustamisen lähtöaineistona.

2.5.2 Piirteiden irrotus koealoille

Maastossa mitatuille referenssikoealoille irrotettiin piirteet laserpisteaineistosta koealojen alueelta. Irrotus tapahtui leikkaamalla laserpistepilvi koealan alueelta ja laske-
malla irrotetuille pisteille arvoja, jotka perustuivat pisteiden korkeusjakaumaan. Laskettavat piirteet valittiin aiempien tutkimusten perusteella (Næsset 2002; Yu, ym. 2010). Piirteiden laskenta tehtiin niistä kasvillisuuspisteistä, jotka sijaitsivat yli kahden metrin korkeudella maan pinnasta. Lämpäisevyyden laskennassa käytettiin kasvillisuus-
pisteiden lisäksi maapisteitä. Lasketettujen piirteiden nimet ja selitteet löytyvät taulukosta 4.

Taulukko 4. Laserpisteaineistosta lasketut piirteet ja niiden selitteet.

Piirre	Selite
hmean	Laserpisteiden korkeuksien keskiarvo
hmax	Laserpisteiden korkeuksien korkein arvo
hmin	Laserpisteiden korkeuksien alin arvo
hstd	Laserpisteiden korkeuksien keskihajonta
cv	Laserpisteiden korkeuksien variaatiokerroin
percentiles 10–100 returns below 10–90	Laserpisteiden korkeuksien prosenttipisteet Tietyn korkeuden alapuolelta heijastuneiden pisteiden määrän suhde kaikkien pisteiden määrään. Käytetyt vertailukorkeudet prosentteja maksimikorkeudesta.
penetration	Laserpisteaineiston läpäisevyys eli kasvillisuudesta heijastuneiden laserkaikujen määrän suhde maanpinnalta heijastuneiden laserkaikujen määrään

2.5.3 Piirteiden irrotus hilan soluille

Koko alueen metsävaratiedon ennustamista varten tutkimusalueelle muodostettiin hilaverkko, joka koostui 16×16 metrin kokoisista soluista. Laserpisteaineisto leikattiin hilaverkolla siten, että jokaiselle laserpisteelle voitiin osoittaa solu johon se kuuluu. Tämän jälkeen jokaiselle hilaverkon solulle laskettiin laserpistepiirteet soluun kuuluvista laserpisteistä. Laskennassa käytettiin samoja laserpistepiirteitä kuin koealalle laskettaessa (taulukko 4).

2.5.4 Piirteiden valinta ja metsävaratiedon ennustaminen hilalle

Metsävaratiedon ennustamisessa käytettiin lähimmän naapurin menetelmää. Lähimpien naapurien menetelmässä kullekin selitettävälle etsitään piirreavaruudesta lähimmät selittäjät. Metsätunnusten estimoinnissa selitettävät ovat hilaverkon soluja ja selittäjät mitattuja koealoja. Etäisyyksien laskentaan piirreavaruudessa voidaan käyttää eri menetelmiä. Metsätunnusten ennustamisessa etäisyyksien laskentaan on yleisimmin käytetty msn ja random forest -algoritmeja. Tässä tutkielmassa etäisyyksien laskenta tehtiin random forest -algoritmillä.

Lähimpien naapurien etsintä tehtiin random forest -algoritmillä. Random forest on Breimanin (2001) kehittämä algoritmi, joka perustuu regressiopuiden käyttöön. Random forest muodostaa satunnaisesti useita regressiopuita, joista voidaan laskea useita erilaisia luokittelu- ja ennustussääntöjä. Kahta kolmasosaa regressiopuista käytetään opetusaineistoa ja loppuja aineiston testaamiseen. Opetusaineistosta valitaan selittäjät sen perusteella kuinka todennäköistä on, että ne luokituksessa päätyvät selitettävän kanssa samaan solmuun. Selittäjien ja regressiopuiden määrää on mahdollista muuttaa ja ne valitaan tapauskohtaisesti siten, että luokitteluvirhe jää mahdollisimman pieneksi.

Tässä tutkielmassa random forest -algoritmin regressiopuiden määränä käytettiin 1000 puuta, jota on pidetty aiemmissa tutkimuksissa laskennan raskauden ja mallin selittävyuden kannalta sopivana regressiopuiden määränä (Kankare ym. 2014, Vastaranta ym. 2013c). Selittäjien määrän vaikutusta tarkasteltiin asettamalla arvoksi 3, 5

ja 7 selittäjää. Random forest -menetelmä perustuu heuristiseen optimointiin, joten se ei anna eri ajokerroilla samoja arvoja, vaikka syötetyt parametrit ja käytetty aineisto olisivat samat. Tämän vuoksi laskenta tehtiin kullakin parametriyhdistelmällä 100 kertaa ja lopulliset puustotiedot saatiin laskenta-ajojen keskiarvoina.

2.5.5 Metsävaratiedon laskenta kuvioille

Metsävaratieto estimoitiin ensiksi koko tutkimusalueen kattaneelle hilaverkolle, jossa hilaverkon solujen koko oli 16×16 metriä. Hilaverkolta solujen tulokset yleistettiin kuviolle laskemalla kunkin kuvion alueella sijainneiden hilaverkon solujen keskiarvona. Hilan solu katsottiin kuuluvaksi kuviolle, mikäli yli puolet sen pinta-alasta oli kuvion alueella. Vertailuaineistona käytetystä monilähde-VMI:n rasteriaineistosta metsävaratieto kuvioille laskettiin samaan tapaan kuin laserkeilauksella tulkitusta aineistosta.

2.5.6 Metsävaratiedon estimointi latvusmallilta

Latvusmallia käytettäessä metsävaratiedon ennustamisen vaiheet poikkesivat ainoastaan piirrelaskennan osalta. Siinä missä laserpisteaineistoa käytettäessä koealoille ja hilaverkon soluille laskettiin piirteet laserpisteaineiston laserpisteiden korkeusarvoista, laskettiin piirteet latvusmallilta käyttäen latvusmallin 1×1 metrin kokoisten solujen korkeusarvoja. Näistä soluista voitiin laskea muuten samat piirteet kuin laserpisteaineistostakin, mutta läpäisevyyden laskeminen ei ollut mahdollista, koska latvusmalli kuvaa nimenomaan puuston latvustoa, eikä aineistosta voida määrittää maa- ja kasvillisuus pisteitä tai soluja samaan tapaan kuin laserpisteaineistosta.

2.6 Tarkkuuden arviointi

Metsävaratiedon ennustaminen tehtiin tarkasteluun valituille 29 kuviolle (ks. luku 2.3). Tarkastelua varten kuviot eroteltiin ensiharvennus- ja päätehakkukuvioihin. Ennustamisen tarkkuutta tarkasteltiin erikseen eri tunnusten estimaattien osalta. Lisäksi vertailtiin k :n arvon vaikutusta estimaattien tarkkuuteen ja eri lähtöaineistoista saatujen estimaattien tarkkuuden eroja. Vaikka aineiston estimointi tehtiin erikseen eri laserkeilausalueille, tarkasteltiin saatuja tuloksia koko tutkimusalueelta.

Kaukokartoitusaineistoista laskettujen estimaattien tarkkuutta tarkasteltiin laskemalla kullekin estimoidulle tunnukselle absoluuttinen ja suhteellinen keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) (kaavat 4 ja 5) sekä absoluuttinen ja suhteellinen harha (kaavat 6 ja 7).

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

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

$$harha = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (6)$$

$$harha \% = 100 \times \frac{harha}{\bar{y}} \quad (7)$$

y_i = muuttujan y mitattu arvo kuviolla i

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

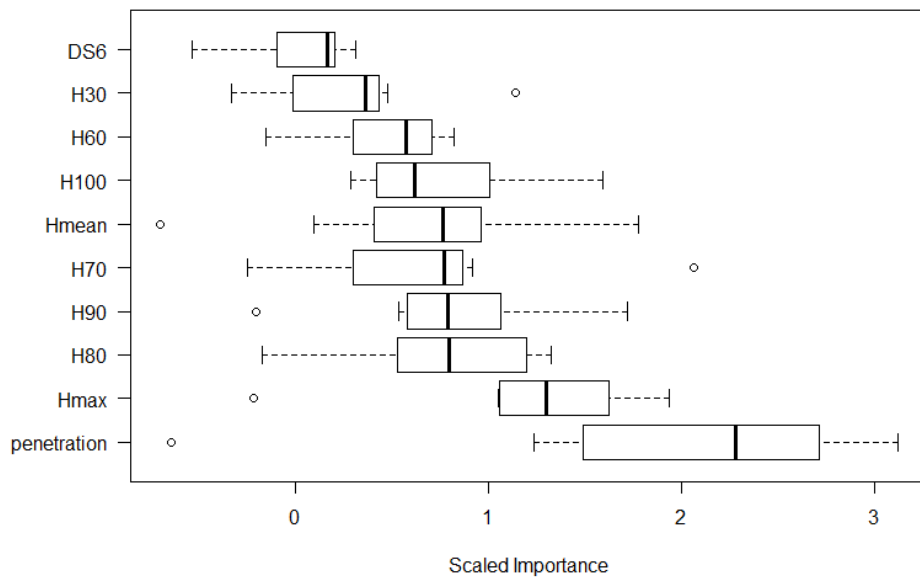
\bar{y} = muuttujan y mitattujen arvojen arimeettinen keskiarvo

n = kuvioiden lukumäärä

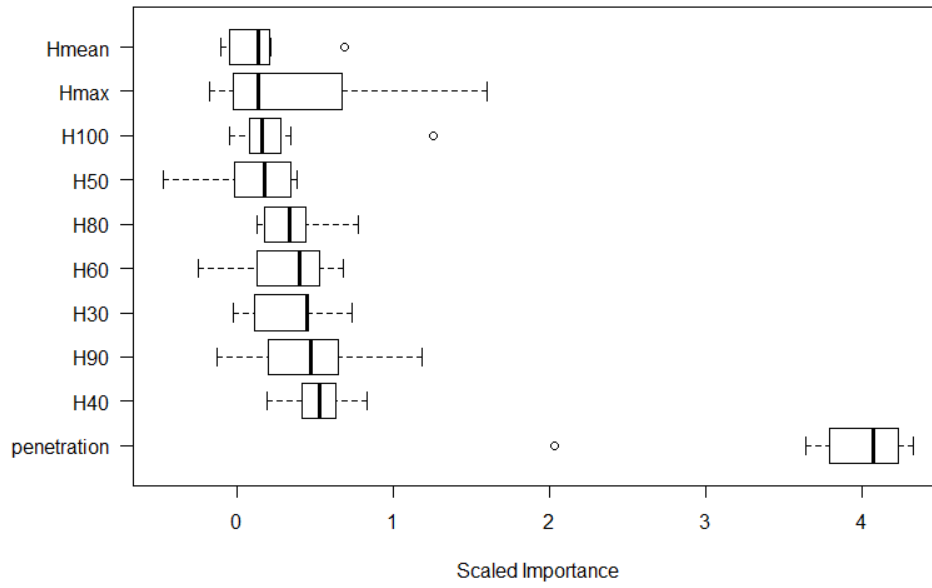
3 TULOKSET

3.1 Piirrevalinta

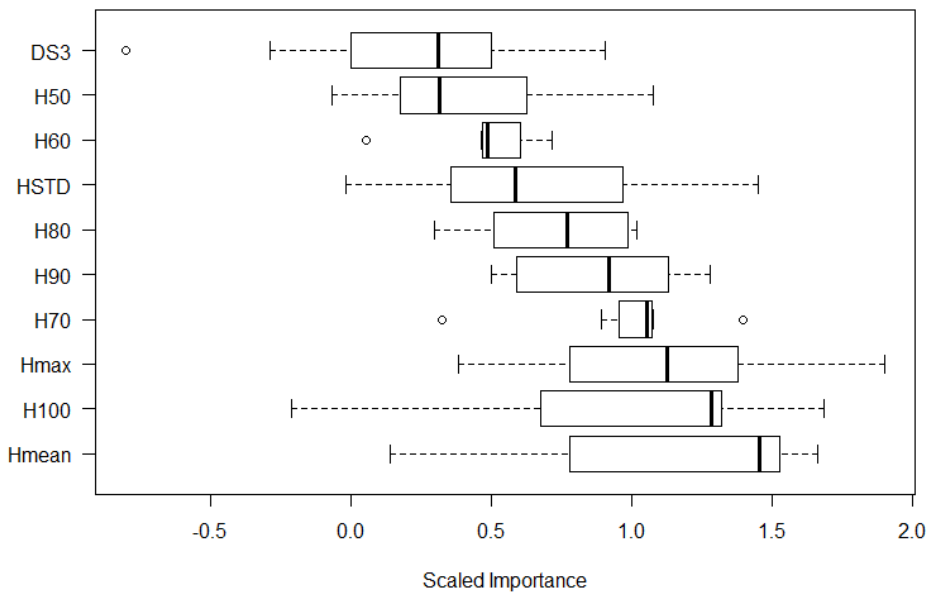
Piirrevalinta tehtiin metsävaratiedon ennustamisen yhteydessä random forest -algoritmilla. Käytettäessä random forest -algoritmia etäisyyksien laskennassa laskentaan otetaan mukaan kaikki lasketut piirteet. Algoritmi laskee eri piirteille niiden merkittävyyden, jota käytetään etäisyyksien laskennassa. Kuvissa 3 ja 4 on kuvattu kymmenen merkittävintä ennustamisessa käytettyä piirrettä ja niiden luokitteluvirheet Box-and-Whisker-kuvaajalla, kun ennustamiseen on käytetty laserpisteaineistoa. Kummallekin laserkeilausaineistolle on omat kuvaajansa, koska laskenta tehtiin kummallekin alueelle erikseen. Latvusmallilta tehdyn ennustamisen merkittävimmät piirteet ja niiden luokitteluvirheet löytyvät kuvista 5 ja 6.



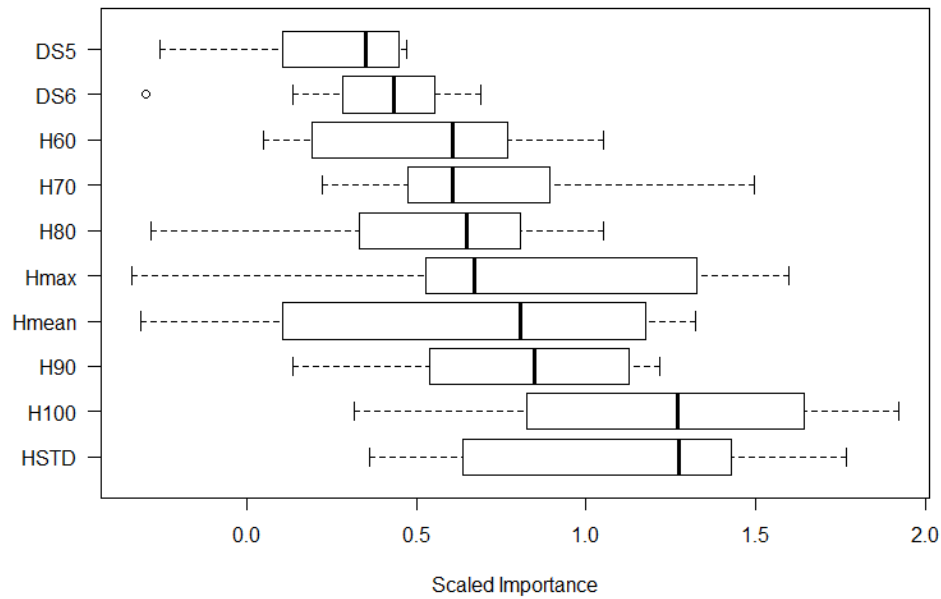
Kuva 3. Merkittävimmät piirteet Hämeenlinnan laserkeilausalueen laskennassa, kun aineistona oli pistepilvi



Kuva 4. Merkittävimmät piirteet Vehkajärven laserkeilausalueen laskennassa, kun aineistona oli pistepilvi



Kuva 5. Merkittävimmät piirteet Hämeenlinnan laserkeilausalueen laskennassa, kun aineistona oli latvusmalli



Kuva 6. Merkittävimmät piirteet Vehkajärven laserkeilausalueen laskennassa, kun aineistona oli latvusmalli

3.2 Lähimpien naapurien määrän vaikutus tilavuus- ja biomassaestimaatteihin

Pistepilvestä tehdyissä estimoinneissa mukaan otettavien naapurien määrän eli k -parametrin vaikutusta tarkasteltiin kahden tunnuksen, kokonaistilavuuden ja -biomassan kautta. Tarkastelussa ei ilmennyt suuria eroja estimaattien tarkkuudessa kummallakaan aineistolla. Pistepilvestä laskettujen tilavuusestimaattien suhteellinen RMSE vaihteli 19,0 prosentista 19,3 prosenttiin. Estimaatti oli tarkin k :n arvoilla 3 ja 5, joilla kummallakin estimaatin tarkkuudeksi saatiin 19,0 %. Biomassaestimaatin suhteellinen RMSE vaihteli 18,6 % ja 18,9 % välillä ollen tarkimmillaan k :n arvolla 3. Estimaattien suhteelliset RMSE:t eri k :n arvoilla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Pistepilvestä laskettujen tilavuus- ja biomassaestimaattien suhteellinen RMSE eri k :n arvoilla

k:n arvo	Tilavuus, RMSE (%)	Biomassa, RMSE (%)
3	19,0	18,6
5	19,0	18,8
7	19,3	18,9

Latvusmallilta laskettujen tilavuusestimaattien suhteelliset RMSE:t vaihtelivat 20,4 ja 20,7 prosentin välillä estimaatin ollessa tarkin k:n arvolla 3 ja epätarkin arvolla 7. Biomassaestimaatin arvot vaihtelivat välillä 19,5 ja 19,7 prosenttia. Estimaatti oli niin ikään tarkin k:n arvolla 3 ja epätarkin k:n arvolla 7. Latvusmallista laskettujen tilavuus- ja biomassaestimaattien suhteelliset RMSE:t eri k:n arvoilla on esitetty tarkemmin taulukossa 6.

Taulukko 6. Latvusmallista laskettujen tilavuus- ja biomassaestimaattien suhteellinen RMSE eri k:n arvoilla

k:n arvo	Tilavuus, RMSE (%)	Biomassa, RMSE (%)
3	20,4	19,5
5	20,6	19,6
7	20,7	19,7

Molempien aineistojen osalta k:n arvon vaikutus estimaatin RMSE:hen todettiin melko pieneksi. Molemmilla aineistoilla sekä tilavuudelle että biomassalle saatiin tarkin estimaatti k:n arvolla 3, joka oli pienin laskennassa käytetty k:n arvo. Pienellä arvolla päästään yleensä tarkimpaan estimaattiin, mutta pieni arvo on myös alttiimpi referenssiaineiston virheille eikä tulosta voida aina pitää vakaana (Vastaranta ym. 2013a). Koska k:n arvon vaikutus estimaatin tarkkuuteen havaittiin tällä aineistolla pieneksi, päädyttiin jatkotarkasteluissa käyttämään k:n arvona viittä, mitä on käytetty useissa aiemmissa tutkimuksissa (Vastaranta ym. 2013a).

3.3 Tilavuusestimaattien tarkkuus

Tilavuusestimaatin osalta tulokset on esitelty eri hakkuutyyppeihin jaettuna taulukossa 7. Estimaattien suhdetta maastomittauksiin kuvataan kuvassa 7. Pisteaineistosta lasketun kaikkien kuvioiden kokonaistilavuusestimaatin RMSE oli 43,5 m³ ja suhteellinen RMSE 19,0 %. Kun kuviot eroteltiin ensiharvennus- ja päätehakkuukuvioihin, arvoiksi saatiin ensiharvennuskuvioille 27,0 m³ ja 22,4 % ja päätehakkuukuvioille 54,6 m³ ja 16,5 %. Tilavuusestimaattien harha oli negatiivinen sekä ensiharvennus- että päätehakkuukuvioilla.

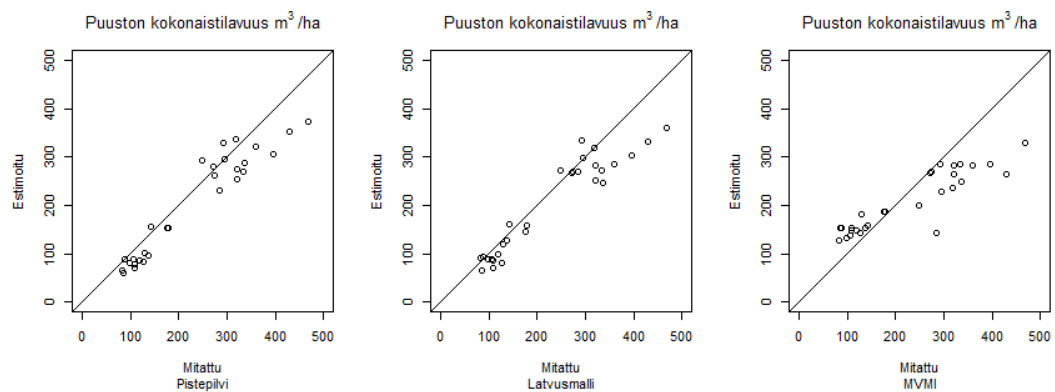
Latvusmallilta lasketulle tilavuusestimaatille saatiin RMSE:n arvoksi 47,8 m³ ja suhteelliseksi RMSE:ksi 20,6 %. Tilavuusestimaatin harha oli -27,5 m³ ja suhteellinen harha -12,0 %. Ensiharvennuskuvioilla RMSE oli 21,8 m³ ja suhteellinen RMSE

18,1 % harhan ollessa $-14,0 \text{ m}^3$ ja suhteellisen harhan $-11,7 \%$. Päätehakkuukuvioilla vastaavat tunnuksot olivat RMSE $62,1 \text{ m}^3$, suhteellinen RMSE $18,8 \%$, harha $-40,1 \text{ m}^3$ ja suhteellinen harha $-12,1 \%$.

Monilähteen VMI:n tilavuusestimaatin RMSE kaikilla kuvioilla oli $68,2 \text{ m}^3$ ja suhteellinen RMSE $29,8 \%$. Aineiston harha oli $-20,9 \text{ m}^3$ ja suhteellinen harha $-9,1 \%$. Aineistossa on havaittavissa selvästi enemmän keskiarvoistumista kuin laseraineistosta lasketuissa estimaateissa. Käytännössä tämä tulee ilmi siten, että ensiharvennuskuvioiden tilavuusestimaatti on liian suuri ja vastaavasti päätehakkuukuvioilla liian pieni.

Taulukko 7. Tilavuusestimaattien tarkkuus suhteessa maastomittauksiin

		RMSE, m^3	RMSE, %	Harha, m^3	Harha, %
Kaikki kuviot	Pistepilvi	43,5	19,0	-27,6	-12,1
	Latvusmalli	47,2	20,6	-27,5	-12,0
	MVMI	68,2	29,8	-20,9	-9,1
Ensiharvennus	Pistepilvi	27,0	22,4	-22,8	-19,0
	Latvusmalli	21,8	18,2	-14,1	-11,7
	MVMI	38,8	32,3	34,0	28,3
Päätehakkuu	Pistepilvi	54,6	16,5	-32,1	-9,7
	Latvusmalli	62,1	18,8	-40,1	-12,1
	MVMI	87,1	26,4	-72,2	-21,9



Kuva 7. Tilavuusestimaattien suhde maastomittauksiin

3.4 Puutavaralajien tilavuusestimaattien tarkkuus

Puutavaralajien ennustustarkkuutta tarkasteltiin laskemalle kullekin kuviolle estimaatit tukki-, kuitu-, ja hukkapuulle. Eri puulajeja ei puutavaralajitarkastelussa eroteltu. Puutavaralajeista hukkapuuosuus kuvaa ensisijaisesti energiapuuksi käytettävissä olevaa runkopuun puuainesta, minkä vuoksi hukkapuuosuus oli tässä tutkielmassa merkittävin tarkasteltava puutavaralajiestimaatti. Puutavaralajien estimaattien tarkastelu tehtiin käyttäen samoja tunnuslukuja kuin kokonaistilavuuden tarkastelussa käytettiin. Taulukossa 8 on esitelty puutavaralajiestimaatit laskettuina pistepilvestä, latvusmallilta ja monilähde-VMI-aineistosta.

Pistepilvestä lasketun kaikkien kuvioiden hukkapuuestimaatin suhteellinen RMSE oli $2,3 \text{ m}^3$ ja suhteellinen RMSE 39,4 %. Estimaatin harha oli $-0,3 \text{ m}^3$ ja suhteellinen harha -4,6 %. Koska harha oli negatiivinen, todettiin hukkapuuestimaatin antavan aliarviota hukkapuun tilavuudesta.

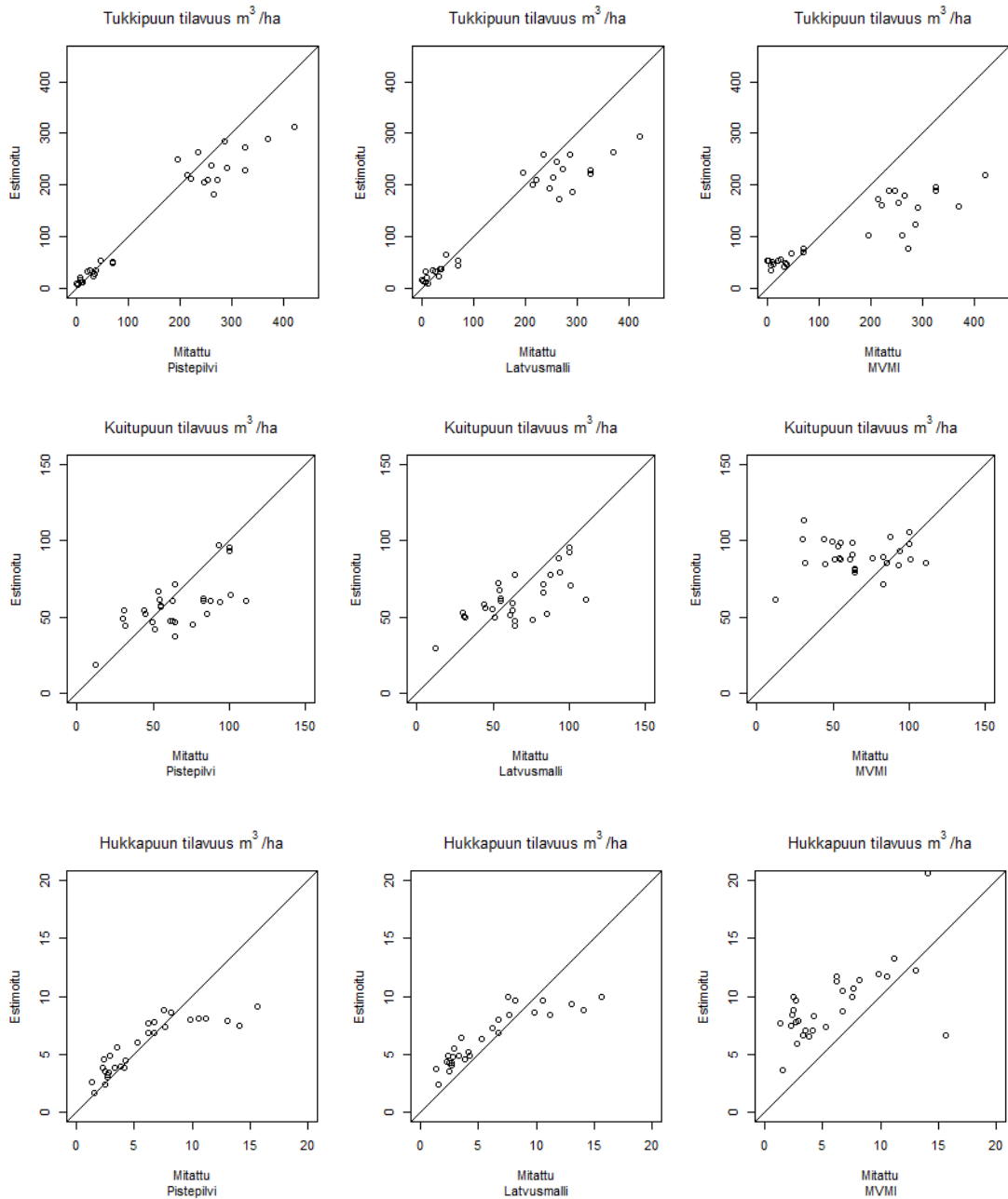
Latvusmallilta lasketun kaikkien kuvioiden hukkapuuestimaatin RMSE:ksi saatiin $2,2 \text{ m}^3$ ja suhteelliseksi RMSE:ksi 38,0 %. Pistepilvestä laskettuun estimaattiin verrattuna RMSE:n arvo oli hieman pienempi. Harhan arvoksi saatiin $0,5 \text{ m}^3$ ja suhteelliseksi harhaksi 8,6 %. Pistepilven estimaattiin verrattuna harha oli aavistuksen suurempi ja toisen suuntainen.

Monilähteisen VMI -aineiston puutavaralajien RMSE:t ja harhat olivat laseraineistosta laskettuja estimaatteja selvästi epätarkempia. Kuten muillakin aineistoilla, osoittautui hukkapuuosuuden estimaatti kaikkein epätarkimmaksi. Hukkapuuestimaatin RMSE oli $4,6 \text{ m}^3$ ja suhteellinen RMSE 77,7 %. Hukkapuuestimaatin harha oli selvästi positiivinen $3,4 \text{ m}^3$ ja suhteellinen harha 58,2 %.

Taulukko 8. Puutavaralajiestimaattien tarkkuudet eri aineistoista laskettuina

		RMSE, m ³	RMSE, %	Harha, m ³	Harha, %
Tukkipuu	Pistepilvi	43,1	27,4	-19,1	-12,1
	Latvusmalli	52,1	33,1	-24,6	-5,3
	MVMI	97,5	62,1	-49,0	-31,2
Kuitupuu	Pistepilvi	20,3	30,5	-8,3	-12,6
	Latvusmalli	18,3	27,8	-3,5	-5,3
	MVMI	35,7	54,3	24,6	37,4
Hukkapuu	Pistepilvi	2,3	39,4	-0,3	-4,6
	Latvusmalli	2,2	38,0	0,5	8,6
	MVMI	4,6	77,7	3,4	58,2

Verrattaessa saatuja estimaatteja maastomittauksiin (kuva 8), voidaan todeta kaikkien tilavuusestimaattien yliarvioivan tilavuutta nuorissa metsiköissä, missä tilavuus on pieni ja aliarvioivan tilavuutta vanhoissa metsiköissä, missä tilavuus on suuri. Ilmiö koskee kaikkia puutavaralajeja tukkipuusta hukkapuuhun. Monilähdeinventoinnin aineistoa käytettäessä ilmiö on samankaltainen tukkipuulla, mutta kuitu- ja hukkapuun tilavuusestimaatti yliarvioi tilavuutta kaikilla kuvioilla. Tämä on todettavissa myös taulukosta 6, jossa kuitupuun ja hukkapuun harhat ovat MVMI-aineistolla huomattavan suuret.



Kuva 8. Puutavaralajien tilavuusestimaatit suhteessa maastomittauksiin

Puutavaralajiestimaattien tarkkuutta tarkasteltiin kaikkien kuvioiden lisäksi erikseen ensiharvennus- ja päätehakkuukuvioidella. Saatujen estimaattien tarkkuudet on esitetty taulukossa 9 ensiharvennuskuvioiden ja taulukossa 10 päätehakkuukuvioiden osalta. Laskettujen estimaattien tarkastelussa todettiin sekä RMSE:n että harhan olevan suurempi ensiharvennusvaiheen kuvioilla kuin päätehakkuukuvioidella. Käytettäessä pisteaineistoa hukkapuuestimaatin harha ensiharvennuskuvioilla oli negatiivinen harhan ollessa $-1,3 \text{ m}^3$ ja suhteellisen harhan $-14,8 \%$. Päätehakkuukuvioidella harha oli sitä vastoin positiivinen harhan ollessa $0,7 \text{ m}^3$ ja suhteellisen harhan $24,6 \%$.

Latvusmallista lasketuista estimaateista sekä RMSE oli suurempi ensiharvennuskuvioilla ($2,7 \text{ m}^3$) kuin päätehakkuukuvioilla ($1,7 \text{ m}^3$) että suhteellinen RMSE olivat suurempia päätehakkuukuvioilla (56,1 %) kuin ensiharvennuskuvioilla (30,2 %). Päätehakkuukuvioiden hukkapuuestimaatin suhteellisen RMSE:n voidaan todeta olevan huomattavan suuri. Myös harha oli suurempaa päätehakkuu- kuin ensiharvennuskuvioilla. Päätehakkuukuvioilla suhteellinen harha oli huomattavan suurta arvon ollessa 52,0 %. Käytännössä energiapuun korjuun suunnittelussa suhteellista arvoa enemmän merkitystä on kuitenkin absoluuttisella tarkkuudella.

Taulukko 9. Puutavaralajiestimaattien tarkkuus ensiharvennuskuvioilla

		RMSE, m^3	RMSE, %	Harha, m^3	Harha, %
Tukkipuu	Pistepilvi	10,6	39,8	1,0	3,6
	Latvusmalli	14,3	53,7	4,6	17,3
	MVMI	31,3	117,7	27,0	101,5
Kuitupuu	Pistepilvi	26,5	31,3	-22,4	-26,5
	Latvusmalli	22,1	26,1	-18,1	-21,4
	MVMI	16,9	20,0	4,9	5,7
Hukkapuu	Pistepilvi	3,2	35,1	-1,3	-14,8
	Latvusmalli	2,7	30,2	-0,6	-6,5
	MVMI	4,2	46,4	2,2	24,3

Taulukko 10. Puutavaralajiestimaattien tarkkuudet päätehakkuukuvioilla

		RMSE, m^3	RMSE, %	Harha, m^3	Harha, %
Tukkipuu	Pistepilvi	59,1	21,2	-37,8	-13,5
	Latvusmalli	71,1	25,5	-51,8	-18,6
	MVMI	132,2	47,4	-119,9	-43,0
Kuitupuu	Pistepilvi	12,1	25,0	4,9	9,8
	Latvusmalli	13,9	28,7	10,2	21,1
	MVMI	46,9	97,3	43,1	89,3
Hukkapuu	Pistepilvi	1,0	34,0	0,7	24,6
	Latvusmalli	1,7	56,1	1,5	52,0
	MVMI	4,9	166,2	4,6	155,4

3.5 Biomassaestimaattien tarkkuus

Tilavuuksien lisäksi mahdollista energiapuupotentiaalia tarkasteltiin estimoimalla puun eri osien biomassaa. Biomassat laskettiin kaikelle maan päälliselle biomassalle, runkopuulle, latvusbiomassalle ja kantobiomassalle. Biomassaestimaattien tarkkuutta on kuvattu kaikkien kuvioiden osalta taulukossa 11. Kuvassa 9 on kuvattu biomassaestimaattien suhdetta maastomittauksiin. Ensiharvennus- ja päätehakkuukuvioiden harhat on kuvattu erikseen taulukoissa 12 ja 13. Tarkin biomassaestimaatti kaikkia kuvioita tarkasteltaessa saatiin kantobiomassalle, jonka suhteellinen RMSE oli 18,6 % ja seuraavaksi tarkin kokonaisbiomassalle, jonka suhteellinen RMSE oli 18,8 %. Epätarkin estimaatti oli runkobiomassalla, jonka suhteelliseksi RMSE:ksi saatiin 23,8 %. Kaikkien tunnusten estimaattien harhat olivat negatiivisia eli tulkinta antoi biomassalle aliarviota.

Latvusmallilta laskettujen biomassaestimaattien tarkin estimaatti kaikilla kuvioilla saatiin kokonaisbiomassalle, jonka suhteellinen RMSE oli 19,7 %. Seuraavaksi tarkimmat estimaatit olivat kanto- ja latvusbiomassoilla. Epätarkin estimaatti saatiin runkobiomassalle, jonka suhteellinen RMSE oli 24,5 %. Kaikkien biomassatunnusten estimaattien harhat olivat negatiivisia eli ne antoivat aliarviota biomassan määrästä. Kaikkien biomassaestimaattien suhteellinen RMSE oli pienempi päätehakkuu- kuin ensiharvennuskuvioilla. Myös suhteelliset harhat olivat pienempiä päätehakkuukuvioilla.

Taulukko 11. Biomassaestimaattien tarkkuudet kaikilla kuvioilla

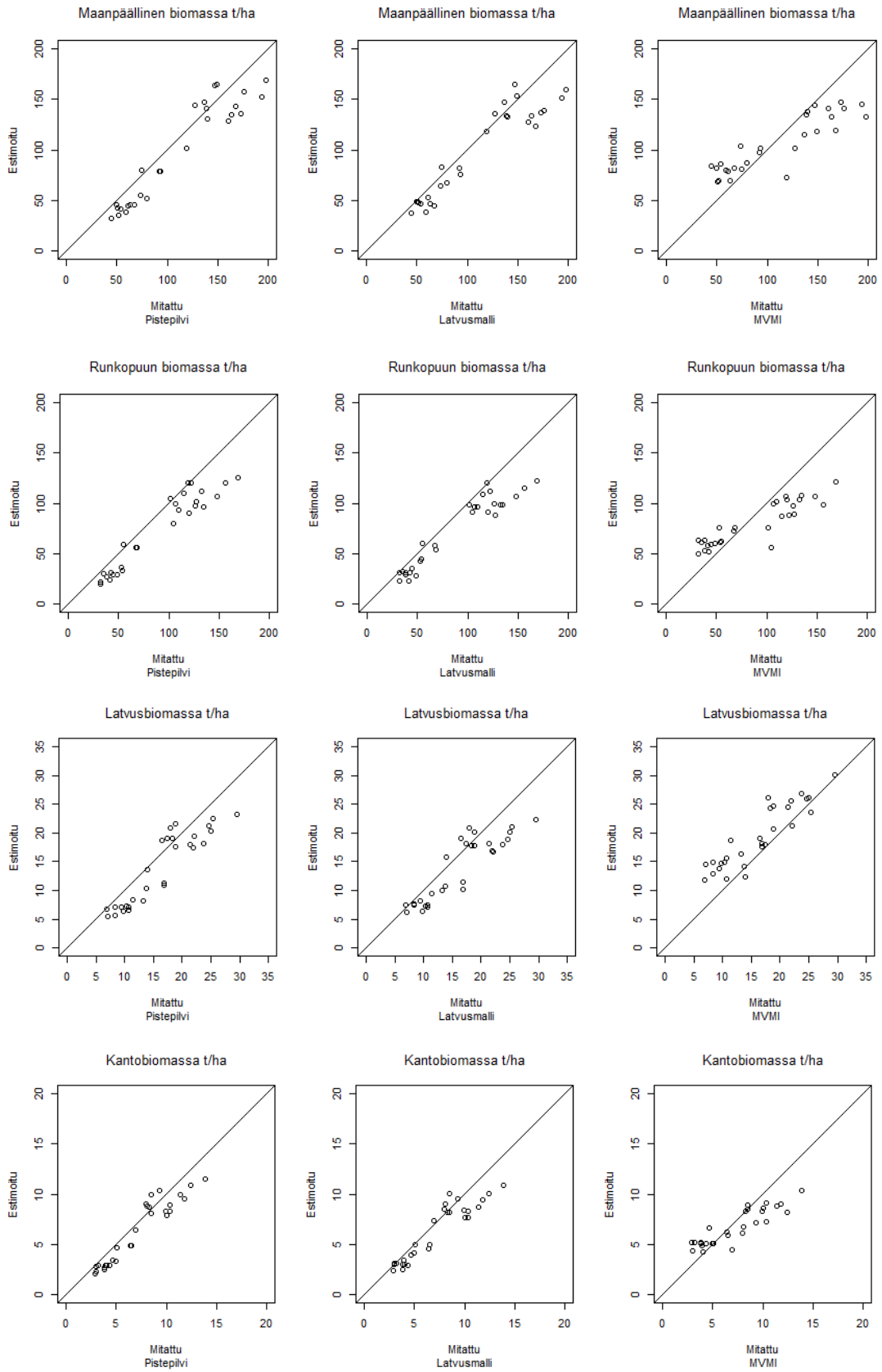
		RMSE, t	RMSE, %	Harha, t	Harha, %
Runkobiomassa	Pistepilvi	20,9	23,8	-16,5	-18,9
	Latvusmalli	21,5	24,5	-16,2	-18,5
	MVMI	26,8	30,6	-7,7	-8,9
Latvusbiomassa	Pistepilvi	3,5	21,8	-2,4	-14,8
	Latvusmalli	3,7	22,8	-2,4	-14,9
	MVMI	4,1	25,5	3,1	19,4
Kokonaisbiomassa	Pistepilvi	21,5	18,6	-14,1	-12,3
	Latvusmalli	22,5	19,7	-14,0	-12,2
	MVMI	29,7	26,0	-6,8	-6,0
Kantobiomassa	Pistepilvi	1,3	18,6	-0,9	-12,1
	Latvusmalli	1,5	20,5	-0,9	-12,4
	MVMI	1,8	25,6	-0,5	-7,1

Taulukko 12. Biomassaestimaattien tarkkuudet ensiharvennuskuvioilla

		RMSE, t	RMSE, %	Harha, t	Harha, %
Runkobiomassa	Pistepilvi	13,4	29,0	-11,9	-25,8
	Latvusmalli	10,9	23,6	-8,7	-18,8
	MVMI	17,6	38,1	15,8	34,1
Latvusbiomassa	Pistepilvi	3,6	32,9	-3,2	-29,4
	Latvusmalli	3,2	29,3	-2,6	-23,6
	MVMI	4,6	42,4	4,1	37,0
Kokonaisbiomassa	Pistepilvi	15,8	24,3	-13,8	-21,2
	Latvusmalli	12,1	18,6	-9,1	-14,0
	MVMI	21,5	33,0	18,6	28,6
Kantobiomassa	Pistepilvi	1,1	26,3	-1,0	-24,0
	Latvusmalli	0,9	22,1	-0,7	-17,3
	MVMI	1,2	29,2	0,9	21,7

Taulukko 13. Biomassaestimaattien tarkkuudet päätehakkuukuvioilla

		RMSE, t	RMSE, %	Harha, t	Harha, %
Runkobiomassa	Pistepilvi	25,9	20,6	-20,8	-16,5
	Latvusmalli	27,9	22,1	-23,2	-18,4
	MVMI	33,2	26,3	-29,8	-23,6
Latvusbiomassa	Pistepilvi	3,4	16,4	-1,6	-7,7
	Latvusmalli	4,1	19,4	-2,2	-10,6
	MVMI	3,6	17,0	2,3	10,8
Kokonaisbiomassa	Pistepilvi	25,7	16,0	-14,4	-9,0
	Latvusmalli	29,0	18,1	-18,5	-11,5
	MVMI	35,7	22,3	-30,6	-19,0
Kantobiomassa	Pistepilvi	1,5	15,9	-0,7	-7,3
	Latvusmalli	1,8	18,5	-1,0	-10,5
	MVMI	2,2	22,8	-1,8	-18,7



Kuva 9. Biomassaestimaattien suhde maastomittauksiin

4 TULOSTEN TARKASTELU

4.1 Tulosten tarkastelusta

Tulosten tarkastelussa saatuja tuloksia on arvioitu erikseen tilavuus-, puutavaralaji- ja biomass aestimaattien osalta. Saatuja tuloksia on verrattu muihin kaukokartoitusmenetelmiin ja kuvioittaiseen arviointiin. Vertailuun pyrittiin löytämään aiempia kuviotason tutkimuksia. Suurin osa aiemmista tutkimuksista on tarkastellut laserkeilauksella tuotettujen estimaattien tarkkuutta koealatasolla, minkä vuoksi aiempien kuviotason tutkimusten löytyminen etenkin biomass aestimaatin osalta oli hankalaa. Luvun lopuksi on tarkasteltu mahdollisia virhelähteitä.

4.2 Tilavuusestimaatti

Tilavuus on yksi tärkeimmistä kuviotason tunnuksista. Tässä tutkielmasta tilavuusestimaatin tarkkuutta tarkasteltiin kokonaistilavuuden ja puutavaralajien tilavuuksien osalta. Tilavuuden tarkastelussa ei eroteltu puulajeja vaan tarkastelu tehtiin kaikkien puulajien kokonaistilavuudelle.

Kaikkien kuvioiden tarkastelussa tilavuusestimaatin RMSE oli pistepilviaineistosta laskettuna $43,5 \text{ m}^3 / 19,0 \%$ ja latvusmallilta $47,2 \text{ m}^3 / 20,6 \%$. Harha oli molemmilla aineistoilla huomattava ja negatiivinen, pistepilvellä $-27,6 \text{ m}^3 / 12,1 \%$ ja pintamallilla $-27,5 \text{ m}^3 / -12,0 \%$. Tarkemmin estimaattien paikkansapitävyys käy ilmi taulukosta 5. Harha oli niin ikään negatiivinen molemmilla aineistolla sekä ensiharvennus- että päätehakkuukuvioilla. Yleensä kaukokartoituksella tuotetut estimaatit keskiarvoistuvat jonkin verran, joten harhan muuttumattomuus eri leimikkotyypeillä oli odottamatonta.

Harhan syitä voivat olla koeala-aineiston huono edustavuus tai huonosti sovitettu malli. On myös mahdollista, että referenssimittauksissa kuvioiden tilavuuksiin on tullut jonkin verran yliarviota, koska koealojen sijoittamista epäedustaviin paikkoihin vältettiin. Edustavien paikkojen etsinnässä maastomittaja sijoittaa koealat monesti hieman keskimääräistä tiheämpiin maastonkohtiin. On myös mahdollista, että kuvio-
tunnusten laskennassa reunasolujen mukaan ottaminen kokonaisuudessaan on aiheuttanut systemaattista virhettä kuviotason estimaatteihin.

Monilähdeinventointiaineistolta tilavuusestimaatin tarkkuudeksi kaikilla kuvioilla saatiin 68,2 m³ ja 29,8 %. Ensiharvennus- ja päätehakkuukuvioiden osalta monilähdeinventointiaineisto käyttäytyi odotetulla tavalla. Aineisto antoi yliarviota ensiharvennuskuvioilla (harha 34,0 m³ / 28,3 %) ja aliarvioita päätehakkuukuvioilla (harha 72,2 m³ / -21,9 %). Tämän kaltainen arvojen keskiarvoistuminen on tyyppillistä matalaresoluutioisesta aineistoista kuten satelliittikuvilta tehtävälle inventoinnille (Tomppo 2002, Tuominen & Haakana 2005).

Sekä pistepilvestä että latvusmallilta lasketut estimaatit olivat tarkempia kuin mihin koealatason tutkimuksissa on yleisesti päästy (Kankare ym. 2013, Vastaranta ym. 2013b). Sen sijaan tarkkuus oli huomattavasti huonompi kuin Packalénin ja Maltamon (2007) saamat kuviotason tulokset. Selvää yksittäistä syytä suureen eroon tarkkuuksissa on vaikea löytää, mutta eroa voi selittää Packalénin ja Maltamon tutkimuksen kuvioiden keskimäärin suurempi koko. Suuret kuviot eivät ole yhtä herkkiä yksittäisten solujen estimointivirheille ja kuviotason ennusteiden on todettu paranevan kuviokoon kasvaessa (Hyypä & Hyypä 2001). Taulukossa 14 on esitetty eräiden aiempien tutkimusten tuloksia kuviotason arvioinnista sekä tässä tutkielmassa saadut tulokset.

Taulukko 14. Tilavuusestimaattien tarkkuuden vertailu aiempiin tutkimuksiin

Inventoinnin tyyppi	Tutkimus	Tarkastelun taso	Tilavuus, RMSE (%)
Kuvioittainen arviointi	Poso 1983	kuvio	29,0–36,0
	Laasasenaho & Päivinen 1986	kuvio	17,0–24,0
	Haara & Korhonen 2004	kuvio	27,1
Optiset satelliittikuvat	Holmgren ym. 2000	kuvio	36,0
	Hyypä ym. 2000	kuvio	56,0
Laserkeilaus	Packalen & Maltamo 2007	kuvio	10,4
	Kankare ym. 2013	koeala	24,9
	Vastaranta ym. 2013b	koeala	24,8
Laserkeilaus, pistepilvi	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	19,0
Laserkeilaus, latvusmalli	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	20,6
Monilähde-VMI	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	29,8

4.2.1 Puutavaralajiestimaatit

Puutavaralajiestimaatit ovat tärkeitä tunnuksia hakkuukertymän arvioinnissa. Puutavaralajien tarkastelu tehtiin ilman puulajitietoa eli kaikkien puulajien puutavaralajeja tarkasteltiin yhdessä.

Aiemmissä tutkimuksissa ei ole juurikaan tarkasteltu kuviotason ennusteita puutavaralajeille vaan tarkastelu on tehty pääasiassa koealatasolla. Tämän vuoksi puutavaralajiestimaattien tarkkuutta verrattiin ainoastaan kuvioittaiseen arviointiin ja monilähteiseen VMI:n. Aiemmissä tutkimuksissa ei myöskään ole tarkasteltu hukkapuun osuutta vaan ainoastaan tukki- ja hukkapuuta. Tämän vuoksi vertailu muihin tutkimuksiin tehtiin ainoastaan tukki- ja hukkapuuosuuksille. Ainoa vertailukohta tutkielman ulkopuolisista tuloksista oli Haaran ja Korhosen monilähde-VMI aineistolla tekemä tutkimus vuodelta 2004.

Puutavaralajien estimaatit käyvät ilmi taulukosta 8. Taulukosta selviää se, että sekä pistepilveltä että latvusmallilta lasketut estimaatit aliarvioivat niin tukki- kuin kuitupuuosuutta. Tarkasteltaessa tukkipuuestimaattien harhoja leimikkotyypeittäin voidaan todeta, että molemmat aineistot antoivat yliarviota ensiharvennusleimikoilla ja aliarvioita päätehakkuuleimikoilla. Kuitupuun osalta estimaattien harhat olivat toisin päin, aliarviota syntyi ensiharvennuksilla ja yliarviota päätehakkuilla. Tämän tyyppinen arvojen keskiarvoistuminen on tyypillistä kaukokartoituksella tuotetulle metsävaratiedolle.

Kuvioittaiseen arviointiin verrattuna puutavaralajiestimaatti oli hieman tarkempi tukkipuun osalta, mutta epätarkempi kuitupuulla. Merkittäviä eroja ei puutavaralajien osalta kuitenkaan vertailussa käytettyyn Haaran ja Korhosen tekemään kuvioittaisen arvioinnin tarkkuutta tarkastelleeseen tutkimukseen ollut (taulukko 15).

Monilähde-VMI:n estimaatit olivat selvästi laserkeilauksella tuotettuja estimaatteja epätarkempia ja aineiston tuottamien estimaattien harha muodostui sekä tukki- että kuitupuulla suureksi niin ensiharvennus- kuin päätehakkuuleimikoilla.

Taulukko 15. Puutavaralajittaisten estimaattien vertailu aiempiin tutkimuksiin

Inventoinnin tyyppi	Tutkimus	Tukki, RMSE (%)	Kuitu, RMSE (%)
Kuvioittainen arviointi	Haara & Korhonen 2004	44,6	27,0
Laserkeilaus, pistepilvi	Lindberg 2016 Pro Gradu	27,4	30,5
Laserkeilaus, latvusmalli	Lindberg 2016 Pro Gradu	33,1	27,8
Monilähde-VMI	Lindberg 2016 Pro Gradu	62,1	54,3

4.3 Biomassaestimaatit

Tässä tutkielmassa tärkeimmät energiapuun määrän kuvaamisen käytetyt estimaatit olivat biomassaestimaatit. Tässä tutkielmassa biomassaestimaatit laskettiin useille puun eri osille. Kaikkien biomassaestimaattien tarkkuudet on esitelty edellisen luvun taulukoissa 11, 12 ja 13. Aiemmissä tutkimuksissa on biomassan osalta keskitytty useimmiten ainoastaan puuston kokonaisbiomassaan. Tämän vuoksi tulosten tarkastelussa ja vertailussa aiempiin tutkimuksiin keskityttiin puuston kokonaisbiomassaan.

Kuten muillakaan estimaateilla ei biomassaestimaateilla ollut suurta eroa pistepilveltä ja latvusmallilta laskettujen estimaattien välillä. Kokonaisbiomassan osalta pistepilveltä lasketun estimaatin suhteellinen RMSE oli 0,8 % pienempi (18,8 % / 19,6 %). Kokonaisbiomassan estimaatti oli sekä ensiharvennus- että päätehakkuukuviolla hie- man maastomittauksia pienempi (taulukot 11, 12 ja 13). Sama toistui myös muiden biomassaestimaattien kohdalla.

Kuten muidenkin tarkasteltujen tunnusten osalta aiemmat tutkimukset ovat yleensä keskittyneet koealatasen tarkkuuteen kuviotason sijaan. Tämän vuoksi saatuja tuloksia verrattiin myös aiempiin koealatasolla tehtyihin tutkimuksiin. Kuten aiemmin on jo todettu, ovat kuviotason tunnuksset yleisesti ottaen jonkin verran koealatasoa tarkempia, joten tulokset eivät suoraan ole vertailukelpoisia keskenään.

Aiemmat kuviotason tutkimukset, joihin tuloksia vertailtiin, olivat Muukkosen ja Heiskasen (2005) optisilta satelliittikuvilta tekemä tutkimus sekä Kotamaan ym. (2009) laserkeilausaineistosta tekemä tutkimus. Tässä tutkielmassa kokonaisbiomassan RMSE:ksi saatiin laseraineistolta lähtöaineistosta riippuen 18,8–19,6 % ja monilähde-VMI -aineistolta 26,0 %. Laseraineistolta laskettu estimaatti on samaa luokkaa

Kotamaan ym. (2010) tutkimuksen kanssa, jossa kokonaisbiomassan estimaatiksi saatiin 19,3 %. Vertailussa olleissa koealatasen tutkimuksissa (Næsset & Gobakken 2008, Tuominen & Haapanen 2013, Kankare ym. 2013, Vastaranta ym. 2013b) kokonaisbiomassan estimaatit ovat vaihdelleet 21,9–32,0 % välillä, joten kuviotason estimaatit olivat, kuten odotettua, hieman tarkempia. Verrattuna optisilta satelliittikuvilta lasketuihin estimaatteihin, olivat laserkeilausaineistosta lasketut estimaatit huomattavan paljon tarkempia.

Monilähdeaineistosta laskettu kokonaisbiomassan estimaatti ei poikennut laserkeilausaineiston estimaateista yhtä paljon kuin tilavuusestimaattien kohdalla. Suhteelliseksi RMSE:ksi saatiin 26,0 %. Tarkkuus oli samaa luokkaa laserkeilausaineistosta tehtyjen koealatasen tutkimusten kanssa ja selvästi tarkempi kuin aiemmissa optisia satelliittikuvia käsitelleissä tutkimuksissa, joissa kuviotason RMSE on ollut 43,0 % (Muukkonen & Heiskanen 2005) ja koealatasen RMSE 56,3–59,6 % (Tomppo ym. 2002, Tuominen ym. 2010). Tarkempaa estimaattia saattaa jossain määrin selittää tutkielman kuvioiden suhteellisen pieni koko ja sisäisen vaihtelun vähäisyys verrattuna aiempiin tutkimuksiin. Saatujen tulosten vertailu aiempiin tutkimuksiin on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Kokonaisbiomassaestimaatin tarkkuuden vertailu eräisiin aiempiin tutkimuksiin

Inventoinnin tyyppi	Tutkimus	Tarkastelun taso	Bio-massa, RMSE (%)
Optiset satelliittikuvat	Tomppo ym. 2002	koeala	56,3
	Muukkonen & Heiskanen 2005	kuvio	43,0
	Tuominen ym. 2010	koeala	59,6
Laserkeilaus	Næsset ja Gobakken 2008	koeala	32,0
	Kotamaa ym. 2009	kuvio	19,3
	Tuominen & Haapanen 2013	koeala	22,5
	Kankare ym. 2013	koeala	26,4
	Vastaranta ym. 2013b	koeala	21,9
Laserkeilaus, pistepilvi	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	18,8
Laserkeilaus, latvusmalli	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	19,6
Monilähde-VMI	Lindberg 2016 Pro Gradu	kuvio	26,0

4.4 Mahdollisia virhelähteitä

Tutkimuksen virhelähteet voidaan jakaa karkeasti mittausvirheisiin, kuvioinnista johtuviin virheisiin, kuvion sisäisen vaihtelun aiheuttamiin virheisiin ja laskentamenetelmän virheisiin. Mittavirheet vaikuttavat sekä estimaatin laskemisessa käytettyihin arvoihin että vertailuaineistona käytettyyn kuviokohtaiseen puustotietoon. Kuvioinnin ja kuvion sisäisen vaihtelun virheet vaikuttavat ainoastaan kuviotason puustotietojen tarkkuuteen.

Kaikkien tunnusten osalta estimaattien tarkkuuteen ovat vaikuttaneet virheet koealaineistossa. Laserkeilaustulkinnassa käytettyjen vastinkoealojen virheet vaikuttavat saatujen estimaattien tarkkuuksiin merkittävästi. Tutkielmassa käytetyt vastinkoealat on mitattu oppilastyönä melko kokemattomien mittaajien toimesta, joten on oletettavaa, että mittauksissa on jonkin verran virhettä.

Myös kuvion puustotietojen laskentaan käytettyiden koealojen mittaustiedoissa on todennäköisesti virheitä, jotka vaikuttavat vertailussa käytettävän kuvion puustotietojen tarkkuuteen. Lisäksi kuviotason puustotietojen tarkkuutta heikentää kuvion sisäinen vaihtelu, jota ei koealaotannalla voida kokonaan poistaa. Tutkituilla kuvioilla sisäinen vaihtelu oli paikoitellen huomattavan suurta.

Kuvion reuna-alueiden puusto poikkeaa monesti kuvion muusta puustosta, joskus merkittävästikin. Tässä tutkielmassa metsävaratieto laskettiin kuviolle käyttäen kaikkia niitä hilaruutuja, joiden keskipiste osui kuvion alueelle. Tämä laskentatapa antaa kuvion reuna-alueille niiden todellista edustavuutta suuremman painoarvon ja on todennäköisesti heikentänyt kuviotason ennusteiden tarkkuutta. Painottamalla kuvioiden reuna-alueita niiden todellisella osuudella kuvion pinta-alasta olisi todennäköisesti päästy kuviotason estimaateissa tarkempiin tuloksiin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiapuun ennustamisessa käytettävien tärkeimpien tunnusten osalta voitiin todeta laserkeilauksen soveltuvan hyvin energiapuun määrää kuvaavien biomassaestimaattien kartoitukseen. Menetelmällä tuotetut estimaatit ovat samalla tasolla tai osin jopa tarkempia kuin perinteisellä kuvioittaisella arvioinnilla tuotetut estimaatit. Verrattuna monilähteiseen valtakunnan metsien inventointiin menetelmä oli huomattavasti tarkempi, etenkin puutavaralajiestimaattien osalta.

Tutkimuksessa ei saatu suurta eroa pistepilveltä ja pintamallilta laskettujen estimaattien tarkkuuden välille. Useimpien laskettujen tunnusten kohdalla pistepilvi oli jonkin verran tarkempi, mutta eroa ei voida pitää kovin merkittävänä. Aiempia tutkimuksia pintamallin käytöstä piirteiden laskennassa on melko vähän, joten tämän tutkimuksen tuloksia ei voitu vertailla muihin tutkimuksiin. Koska pistepilvi on tutkitumpi aineisto piirteiden laskennassa, voidaan sitä tällä hetkellä pitää suositeltavampana käytännön sovelluksiin.

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin ainoastaan energiapuuksi kelpaavan puun määrää puutavaralajien tilavuuksien ja biomassan kautta. Tutkielmassa ei pyritty löytämään energiapuunkorjuuseen soveltuvia kuviota tai määrittämään hakkuutarvetta kuvioilla. Jotta energiapuun kartoitus laserkeilauksella palvelisi metsäteollisuuden tarpeita energiapuuleimikoiden etsinnässä, tulisi kehittää menetelmiä, joilla päästään kiinni hakkuutarpeeseen. Hakkuutarpeen lisäksi olisi tarpeen tietää leimikoiden korjuukelpoisuus ja soveltuvuus energiapuukohteiksi.

LÄHTEET

Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine Learning*. 2001, 45: 1–32.

Franco-Lopez, H., Ek, A. & Bauer, M. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251–274.

Haara, A. & Korhonen, K. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. 2004. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.

Holmgren, J., Joyce, S., Nilsson, M. & Olsson, H. 2000. Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Scandinavian Journal of Forest Research*(15): 103–111.

Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 5.

Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y. 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128(1-2): 109–120

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, 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.

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(5): 2257–2274.

Kankare, V., Joensuu, M., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Tanhuanpää, T., Vastaranta, M., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P., Rikala, J. & Sipi, M. 2014. Estimation of the timber quality of scots pine with terrestrial laser scanning. *Forests* 5(8): 1879–1895.

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

Kotamaa, E., Tokola, T., Maltamo, M., Packalén, P., Kurttila, M. & Mäkinen, A. 2010. Integration of remote sensing-based bioenergy inventory data and optimal bucking for stand-level decision making. *European Journal of Forest Research*.

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

Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.

Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen R. & Liski, J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 211–244.

Maanmittauslaitos. 2016. Avoimien aineistojen tiedostopalvelu, laserpisteaineiston metatiedot. [www-sivusto]. Saatavissa: <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta>. [Viitattu 1.5.2016].

McRoberts, R. & Tomppo, E. 2007. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment* 110(4): 412–419.

Metsätutkimuslaitos. 2010. Valtakunnan metsien inventointi (VMI). [www-sivusto]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/info.htm>. [Viitattu 24.3.2014].

Metsäntutkimuslaitos. 2013. Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11). Maastotyön ohjeet 2013. 191s.

Muukkonen, P. & Heiskanen, J. 2005. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. *Remote Sensing of Environment* 99(4): 434–447.

Näslund, M. 1936. Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt*. 29(1): 1–120.

Næsset, M. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61(2): 246–253.

Næsset, E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80(1): 88–99.

Næsset, E. & Gobakken, T. 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment* 112(6): 3079–3090.

Packalén, P. & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method for the prediction of specie specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109: 328–341.

Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17 (4): 313–349

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.

Rosenqvist, Å., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M. & Dobson, C. 2003. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy* 6: 441–445.

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.

Tomppo, E. 1990. Satellite image based national forest inventory in Finland. *The Photogrammetric Journal of Finland* 12(1): 115–120.

Tomppo, E., Nilsson, M., Rosengren, M., Aalto, P. & Kennedy, P. 2002. Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment* 82(1): 156–171.

Tuominen, S., Eerikäinen, K., Schibalski, A., Haakana, M. & Lehtonen, A. 2010. Mapping biomass variables with a multi-source forest inventory technique. *Silva Fennica* 44(1): 109–119.

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 p.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2010. Suomen kansallinen toimintasuunnitelma uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian edistämisestä direktiivin 2009/28/EY mukaisesti.

Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Haapanen, R., Melkas, T., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2011. Individual tree detection and area-based approach in retrieval of forest inventory characteristics from low-pulse airborne laser scanning data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(2). 13 p.

Vastaranta, M., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Wulder, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013. Area-Based Mapping of Defoliation of Scots Pine Stands Using Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sens.* 2013, 5: 1220–1234

Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J. & Kaasalainen, S. 2013b. 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.*

Vastaranta, M., Wulder, M., White, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Kankare, V., Holopainen, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013c. Airborne laser scanning and digital stereo imagery measures of forest structure: comparative results and implications to forest mapping and inventory update. *Canadian Journal of Remote Sensing.* 39(5): 382–395.

Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J. & Kaasalainen, S. 2014. 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.* 52(2): 1197–1204.

Yu, X., Hyypä, J., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Viitala, R. 2011. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66(1): 28–37.