

HELSINGIN YLIOPISTO

# **Maalahopuun kartoitus maastolaserkeilauksella**

Tuomas Yrttimaa  
Maisterin tutkielma  
Helsingin yliopisto  
Metsätieteiden maisteriohjelma  
Metsien ekologia ja käyttö  
Maaliskuu 2018



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty		Laitos/Institution– Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Metsätieteiden osasto	
Tekijä/Författare – Author			
Tuomas Yrttimaa			
Työn nimi / Arbetets titel – Title			
Maalahopuun kartoitus maastolaserkeilauksella			
Oppiaine/Läroämne – Subject			
Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji / Arbetets art – Level	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
Maisterin tutkielma	Maaliskuu 2018	42 s.	
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Lahopuu ylläpitää metsäluonnon monimuotoisuutta, sillä se on välttämätön elinympäristö monille uhanalaisille eliölajeille. Tietoa lahopuun määrästä ja laadusta tarvitaan, jotta voidaan arvioida lahopuun vaikutusta metsäekosysteemin erilaisiin toimintoihin. Lahopuun kartoitus perustuu yhä maastoinventointiin, jossa perinteiset mittavälineet voitaisiin korvata maastolaserkeilauksella. Maastolaserkeilain tuottaa ympäristöstään tiheän pistepilven, jonka millimetritason tarkkuutta voidaan hyödyntää puu- ja koelatasen mittaauksissa. Maastolaserkeilaus on osoittautunut tehokkaaksi tiedonkeruumenetelmäksi elävän puuston koelamittaukseen, mutta sen soveltuvuutta lahopuun kartoitukseen ei ole vielä tutkittu.</p> <p>Tämän tutkielman tavoitteena oli kehittää maastolaserkeilaukseen perustuva automaattinen menetelmä maalahopuun määrän ja laadun kartoitukseen. Maalahopuun kartoitusta varten kerättiin maastolaserkeilausaineisto 20 metsikkökoelalalta (32 m x 32 m). Maastossa koelaloilta kartoitettiin vähintään 5 cm järeät maalahopuurungot kartoitusmenetelmän kehitystä ja tarkkuuden arviointia varten. Maalahopuurungot tunnistettiin koelajon pistepilvistä automaattisesti runkojen geometrinen muotojen perusteella sylinterisovitusta ja pintamallien segmentointia käyttäen. Rungot tunnistettiin myös pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä, jotta voitiin tarkastella, miten hyvin maalahopuut on mahdollista kartoittaa koelaa kuvaavan tiheän pistepilven avulla. Pistepilvistä tunnistetuille rungoille määritettiin dimensiot, joiden perusteella laskettiin runkojen tilavuus- ja järeystunnukset. Runkojen ominaisuus- ja sijaintitietojen avulla muodostettiin kartta maalahopuun jakautumisesta koelalle, estimaatit maalahopuun määrää ja laatua koelatasolla kuvaaville tunnuksille sekä edelleen maalahopuun järeysjakauma koko tutkimusalueelle.</p> <p>Tulokset osoittivat, että maastolaserkeilaus soveltuu tiedonkeruumenetelmäksi maalahopuun kartoitukseen metsikkökoelaloilta. Metsikkökoelaa kuvaavasta pistepilvestä voitiin tunnistaa automaattisesti 68 % maalahopuun tilavuudesta, jolloin maalahopuun kokonaistilavuus määritettiin 15,0 m<sup>3</sup>/ha tarkkuudella (RMSE). Pistepilven visuaalisella tulkinnalla kartoitusta voitiin edelleen tarkentaa: maalahopuun tilavuudesta tunnistettiin 83 %, ja kokonaistilavuusestimaatti määritettiin lähes harhattomasti 6,4 m<sup>3</sup>/ha tarkkuudella. Keskimäärin maalahopuurungon pituus aliarvioitiin ja järeys yliarvioitiin, koska runkoa ei pystytty tunnistamaan pistepilvestä koko pituudeltaan. Tulosten perusteella maastolaserkeilaukseen perustuva maalahopuun kartoitus on sitä luotettavampaa, mitä järeämmästä lahopuusta ollaan kiinnostuneita. Puuston ja aluskasvillisuuden tiheys aiheuttaa kuitenkin pistepilven katvealueita, joilta runkoja ei voida tunnistaa. Siksi maastolaserkeilaukseen perustuvassa maalahopuun kartoituksessa on kiinnitettävä huomiota pistepilven laatuun.</p>			
Avainsanat/ Nyckelord – Keywords			
TLS, monimuotoisuus, biodiversiteetti, pistepilvi, lahopuuintventointi			
Säilytyspaikka / Förvaringställe – Where deposited			
Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja / Övriga uppgifter – Additional information			



Tiedekunta – Fakultet – Faculty		Laitos – Institution – Department	
Faculty of Agriculture and Forestry		Department of Forest Sciences	
Tekijä – Författare – Author			
Tuomas Yrttimaa			
Työn nimi – Arbetets titel – Title			
Mapping downed dead wood using terrestrial laser scanning			
Oppiaine – Läroämne – Subject			
Forest ecology and management			
Työn laji – Arbetets art – Level		Aika – Datum – Month and year	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages
Master's thesis		March 2018	42 p.
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Decaying dead wood is a key factor for forest biodiversity. In boreal forests, many threatened and specialised species are dependent on dead wood. Therefore, information on quantity and quality of dead wood is needed. Conventionally, the inventory of dead wood is based on measurements and observations done in the field with traditional forest measurement tools, which, however, could be replaced by terrestrial laser scanning (TLS). TLS provides a dense point cloud on its surroundings with a millimetre-level of detail enabling versatile measurements at the levels from an individual tree to an entire sample plot. Previous studies have proven TLS to efficiently provide information for mapping standing trees, but the feasibility of TLS for dead wood inventory has not yet examined.</p> <p>The objective of this study was to develop an automatic method for mapping downed dead wood using TLS. TLS data were collected from 20 sample plots (32 m x 32 m in size) using the multi-scan approach with five scanning positions on each plot. All downed dead tree trunks with a diameter exceeding 5 cm at the middle of the trunk were measured in the field and considered as the field reference. Cylinder fitting and surface model segmentation were utilised when the downed dead wood trunks were automatically detected from the point clouds. The trunks were also detected visually to reveal all the potential of the use of a dense point cloud in mapping downed dead wood from a sample plot. Dimensions, volume, geometry-related quality attributes and position in the sample plot were automatically determined for each trunk detected from the point cloud. Based on trunk attributes, a map representing the spatial distribution of downed dead wood, as well as estimates for attributes describing the quantity and quality of downed dead wood at the plot level, were constructed. Finally, a diameter distribution for downed dead wood in the study area was comprised.</p> <p>This study revealed that TLS is a valid method for mapping downed dead wood from sample plots. By utilising the TLS point clouds, 68 % of the downed dead wood volume was detected automatically, while the total volume of downed dead wood was estimated with an RMSE of 15,0 m<sup>3</sup>/ha. The mapping accuracy could be improved with the visual interpretation of the point cloud, in which case 83 % of the dead wood volume was detected, and the estimate for the total volume of downed dead wood was determined with an accuracy of 6,4 m<sup>3</sup>/ha. On average, the length of the detected tree trunk was underestimated while the diameter was overestimated since the trunk was not able to be detected entirely from the point cloud. According to the results, the reliability of TLS based dead wood mapping increases alongside the dimensions of the dead wood trunks. The density of plot vegetation, however, causes shading and reduces the trunk detection accuracy. Therefore, when collecting the data, extra attention must be paid to the quality of the point cloud.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
TLS, biodiversity, point cloud, dead wood inventory			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Helsinki university library – Helda / E-thesis <a href="https://ethesis.helsinki.fi">ethesis.helsinki.fi</a>			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Helsingin yliopiston metsätieteiden osastolla Suomen akatemian rahoittaman Laserkeilauksen huippuyksikön tutkimusryhmässä osana laserkeilaukseen perustuvien mittaus- ja mallinnusmenetelmien kehittämiseen tähtääviä tutkimusprojekteja sekä maa- ja metsätalousministeriön rahoittamaa *Metsätieto ja sähköiset palvelut* -kärkihanketta. Mielenkiintoisesta ja monella tapaa opettavaisesta tutkimusaiheesta on kiittäminen Markus Holopaista ja Mikko Vastarantaa. Mikkoa haluan kiittää lisäksi työn ohjauksesta sekä neuvoista ja kannustuksesta projektin eri vaiheissa. Kiitokset kuuluvat myös Ville Luomalle teknisestä tuesta sekä avusta ja opastuksesta aineiston keruussa.

Helsingissä maaliskuussa 2018

Tuomas Yrttimaa

# Sisällysluettelo

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Työn tausta .....	1
1.2 Lahopuun inventointi- ja kartoitusmenetelmät .....	2
1.3 Maastolaserkeilaus metsän rakenteen kartoituksessa.....	5
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	6
<b>2 AINEISTOT JA MENETELMÄT</b> .....	<b>8</b>
2.1 Tutkimuksessa käytettävät aineistot.....	8
2.1.1 Tutkimusalue .....	8
2.1.2 Maastolaserkeilausaineiston kerääminen metsikkökoealoilta.....	8
2.1.3 Pystypuuston mittaus metsikkökoealoilta .....	9
2.1.4 Metsikkökoealojen valinta maalahopuun kartoitusta varten .....	9
2.1.5 Maastolaserkeilausaineiston kerääminen maalahopuun kartoitukseen .....	10
2.1.6 Maalahopuun mittaukset metsikkökoealoilta.....	11
2.2 Maalahopuun määrän ja laadun kartoitus TLS-pistepilvestä.....	13
2.2.1 TLS-pistepilven esikäsittely.....	13
2.2.2 Maalahopuurunkojen automaattinen tunnistaminen TLS-pistepilvestä .....	14
2.2.3 Maalahopuurunkojen visuaalinen tunnistaminen TLS-pistepilvestä .....	18
2.2.4 Maalahopuun tilavuus- ja laatutunnusten määrittely .....	19
2.3 Maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuuden arviointi .....	21
<b>3 TULOKSET</b> .....	<b>23</b>
3.1 Maalahopuun kartoitusmenetelmän toimivuus.....	23
3.2 Maalahopuun koelatunnusten määrittelyksen tarkkuus.....	25
3.3 Maalahopuurunkojen tunnistamisen tarkkuus .....	26
3.4 Maalahopuurunkojen laatutunnusten määrittelyksen tarkkuus .....	29
<b>4 TULOSTEN TARKASTELU</b> .....	<b>31</b>
<b>5 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>36</b>
<b>KIRJALLISUUS</b> .....	<b>37</b>

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Metsät ylläpitävät ilmakehän kaasutasapainoa sekä luonnon monimuotoisuutta: ilmakehän hiili sidotaan kasvillisuuden biomassaksi, joka muodostaa elinympäristön metsän eliöstölle (esim. Dixon ym. 1994, Esseen ym. 1997, Canadell ja Raupach 2008). Metsässä suurin biomassa on useimmiten elävällä puustolla, mutta luonnontilaisessa borealisessa metsäekosysteemissä myös kuollut puusto on merkittävä osa metsän rakennetta (Esseen ym. 1997, Siitonen 2001). Kuolleesta puusta muodostuu vähitellen lahottajasienten hajottamaa lahopuuta, jolla on merkittävä vaikutus luonnon monimuotoisuuteen ja hiilen kiertokulkuun (Harmon ym. 1986). Lahopuu ylläpitää metsäluonnon biodiversiteettiä, sillä lahotessaan kuollut puu tarjoaa elinympäristön monille uhanalaisille lajeille (Franklin ym. 1987, Siitonen 2001). Pystyyn kuolleisiin sekä maahan kaatuneisiin tai katkenneisiin lahopuurunkoihin varastoitunut hiili vapautuu lahoamisprosessin edetessä ilmakehään, mutta suurin osa siitä säilyy metsäekosysteemissä vielä vuosikymmeniä puun kuoleamisen jälkeen (Harmon ym. 1986).

Lahopuu on monille eliölajeille välttämätön elinympäristö (Franklin ym. 1987, Siitonen 2001). Tällaisia lajeja, jotka ovat riippuvaisia lahopuusta tai toisista lahopuusta riippuvaisista lajeista, kutsutaan saproksyyleiksi (Speight 1989). Suomen metsissä saproksyytilajeja on 4000–5000, joka on 20–25 % kaikista metsälajeista (Siitonen 2001). Saproksyytilajeista varsinkin uhanalaisimmat ovat erikoistuneet vain tietynlaiseen lahopuuhun, joten lahopuun määrä ei yksinomaan selitä eri eliöille suotuisten lahopuuelinympäristöjen runsautta metsässä. Lahopuun laadun eli läpimitan, puulajin ja lahoasteen sekä asennon metsässä on havaittu vaikuttavan lahopuussa elävään eliöstöön (Jonsell ja Weslien 2003, Similä ym. 2003, Tikkanen ym. 2006). Laadultaan monipuolisen lahopuun määrä on yhteydessä metsäluonnon monimuotoisuuteen (Harmon ym. 1986).

Kasvupaikan puuntuotoskyky sekä metsikön maantieteellinen sijainti ja häiriöhistoria vaikuttavat lahopuun määrään metsässä (Franklin ym. 1987, Ahlroth ym. 2004). Ravinteikkaammalla kasvupaikalla puusto on runsaampaa, lahopuuta muodostuu enemmän ja lahoamisprosessi on nopeampaa kuin vähäravinteisemmilla kasvupaikoilla. Metsikön maantieteellisestä sijainnista riippuvat ilmastotekijät kuten lämpösumma ja sademäärä

vaikuttavat puuntuotokseen ja siten myös lahopuun muodostumiseen. Metsäekosysteemiin kohdistuneet häiriöt selittävät erot lahopuun määrässä ja laadussa saman kasvupaikan sisällä (Harmon ym. 1986, Franklin ym. 1987). Talousmetsissä kuollutta puuta on metsänhoitotoimenpiteiden ja puunkorjuun myötä vähemmän kuin luonnontilaisissa metsissä, joissa varsinkin järeää lahopuuta muodostuu erilaisten häiriöiden kuten myrsky- ja hyönteistuhojen seurauksena (Esseen ym. 1997). Lisäksi hakkuutähteiden ja kantojen korjuu metsäbioenergiaksi vähentää talousmetsien lahopuuelin ympäristöjä entisestään (Abrahamsson ja Lindbladh 2006, Nittérus ym. 2006).

Tietoa lahopuun määrästä tarvitaan, jotta voidaan arvioida lahopuun vaikutusta metsäekosysteemin erilaisiin toimintoihin. Suomessa koko maan kattavaa tietoa lahopuun määrästä ja laadusta saadaan valtakunnan metsien inventoinneista (VMI), joissa lahopuun määrää ja laatua on seurattu vuosien 1996–2003 maastomittauksiin perustuvasta valtakunnan metsien yhdeksänneistä inventoinnista alkaen. Valtakunnan metsien inventointi perustuu systemaattiseen ja koko maan kattavaan koelaotantaan, jolloin maastomittauksiin perustuvat tulokset ovat luotettavia suuraluetaolta (yli 200 000 ha) koko maan tasolle (Tomppo ym. 2014, Valtakunnan metsien ... 2015). Pienempien alueiden tarkastelua varten maastokoelatatiedot yleistetään ns. monilähdeinventoinnissa 20 m x 20 m hila-ruutuihin satelliittikuvatulkinnan avulla (Tomppo ja Halme 2004, Tomppo ym. 2008).

Valtakunnan metsien inventoinnin tulosten mukaan yli 10 cm vahvuisen kuolleen puun keskitilavuus on Etelä-Suomessa 3,8 m<sup>3</sup>/ha, Pohjois-Suomessa 8,0 m<sup>3</sup>/ha ja koko maassa 5,7 m<sup>3</sup>/ha (Metsätilastollinen vuosikirja 2014). Inventointitulosten perusteella lahopuun määrä on kuluneena vuosikymmenenä lisääntynyt Etelä-Suomessa ja vähentynyt Pohjois-Suomessa. Koko maan kattavasta tilastosta näkyy metsätalouden vaikutus lahopuun määrään, sillä vanhoissa luonnontilaisissa metsissä lahopuun keskitilavuus on moninkertainen, 20–120 m<sup>3</sup>/ha (Siitonen 2001). Metsien talouskäytöstä johtuvan lahopuun vähene- misen onkin havaittu olevan tavallisin yksittäinen tekijä metsälajien uhanalaisuuteen Suomessa (Rassi ym. 2010). Metsäluonnon monimuotoisuuden ylläpitämiseksi, nykyisen la- jiston säilyttämiseksi ja uhanalaisten lajien elvyttämiseksi tarvitaan jatkossakin ajanta- saista tietoa lahopuun määrästä ja laadusta.

## **1.2 Lahopuun inventointi- ja kartoitusmenetelmät**

Suuralueiden lahopuuinto perustuu yhä otantaan ja perinteisiin maastomittauksiin. Esimerkiksi VMI:ssa käytetään koelainto-ointia, jossa lahopuiksi määritellyt kuolleet

pysty- ja maapuut mitataan metsä- ja kitumaiden pysyviltä koealoilta 7 m säteeltä koealan keskipisteestä (Valtakunnan metsien ... 2009). Talousmetsissä lahpuuta esiintyy harvakseltaan ja useimmiten ryhmittäin, joten koealainventointia tehokkaampi menetelmä lahopuun inventointiin on linja- tai kaistainventointi, jossa maastossa kuljettua matkaa kohden saadaan enemmän lahopuuhavaintoja (Kangas ym. 2004). Myös relaskooppiotantaan perustuva lahopuuinto on havaittu kiinteäsäteistä koealaotantaa luotettavammaksi menetelmäksi (Leino ym. 2006, Pesonen ym. 2009). Lahopuun määrästä ja laadusta kerätään kuitenkin tietoa useimmiten elävän puuston kartoituksen yhteydessä, jolloin systemaattisen koealaotannan käyttö on perusteltua. Paikallista tietoa lahopuun määrästä saadaan metsäsuunnittelussa, jossa metsikön kuolleen puuston määrä arvioidaan maastossa silmämääräisesti (esim. Pukkala 2004).

Maastoinventoinnin lisäksi tietoa lahopuun määrästä voidaan tuottaa kaukokartoituksella. Lahopuun kaukokartoituksessa on useimmiten käytetty optisia kaukokartoitusaineistoja (esim. Bütler ja Schlaepfer 2004, Pasher ja King 2009) ja viime aikoina myös lentolaserkeilausta (Pesonen ym. 2008, Lindberg ym. 2013, Nyström ym. 2014). Lentolaserkeilaus (ALS, Airborne Laser Scanning) on suunnattuun laseretäisyysmittaukseen perustuva aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jossa tarkasteltavan kohteen kolmiulotteista rakennetta kuvaava pistepilvi tuotetaan ilma-aluksesta kohteen yläpuolelta (Holopainen ym. 2013a, 2015). Laserkeilausta on hyödynnetty metsän rakenteen mittauksessa ja ennustamisessa vuosituhanneen vaihteesta alkaen (Hyyppä ja Inkinen 1999, Næsset 2002, White ym. 2013).

Lahopuun kaukokartoitus perustuu lahopuun määrän ennustamiseen metsikön rakenteellisten tunnusten avulla tai yksittäisten lahopuurunkojen tunnistamiseen suoraan kaukokartoitusaineistoista. Tilastolliseen mallinnukseen perustuvassa epäsuorassa kartoitusmenetelmässä hyödynnetään lahopuun määrän riippuvuutta metsikön rakenteesta, josta saadaan kerättyä tietoa eri kaukokartoitusmenetelmillä. Mallinnusta varten tarvitaan metsikkökoaloja, joilta on mitattu lahopuun määrä maastossa. Koeala-aineiston perusteella muodostetaan lahopuun määrän ennustemalli, jossa lahopuun määrää, useimmiten tilavuutta, selitetään metsikön rakennetta kuvaavilla kaukokartoituspiirteillä. Ennustemallin avulla koealatieto voidaan yleistää koko tarkastelualueelle. Lentolaserkeilausaineistoa käytettäessä lahopuun tilavuus metsikkökoealalla ennustetaan koealan pistepilven korkeus- ja tiheysjakaumaa kuvaavien laserpiirteiden avulla (Pesonen ym. 2008). Optisten



kaukokartoitusaineistojen tapauksessa mallinnus perustuu lahopuun määrän riippuvuuteen kuvan sävyarvoista (esim. Pasher ja King 2009).

Yksittäisten lahopuurunkojen tunnistamiseen perustuvissa kaukokartoitusmenetelmissä pyritään tekemään suoria havaintoja ja mittauksia epäsuoran mallinnuksen sijaan. Ilma-kuva-aineistoista voidaan kuvapikselien sävyarvojen perusteella tunnistaa kuolleet pystyput (Bütler ja Schlaepfer 2004, Pasher ja King 2009). Lentolaserkeilauksella pystytään keräämään tietoa latvuston läpi myös maanpinnalta ja siten kartoittamaan maahan kaatuneita runkoja (Lindberg ym. 2013, Nyström ym. 2014). Maahan kaatuneet rungot voidaan tunnistaa esimerkiksi maanpintaa kuvaavien yksityiskohtaisten pintamallien avulla, jos käytettävissä on tiheä (vähintään 50 pistettä/m<sup>2</sup>) ALS-aineisto (Nyström ym. 2014). Kaatuneista rungoista tunnistetaan kuitenkin tällöin vain suurimmat, eikä tunnistettujen runkojen tilavuuksia ja järeyksiä pystytä määrittämään luotettavasti. Vaihtoehto lahopuurunkojen suoraan kartoitukseen on kahtena eri ajankohtana kerätyn ALS-aineiston muutostulkinta, jossa maahan kaatuneet puut voidaan tunnistaa niiden jättämien latvusaukkojen perusteella (Tanhuanpää ym. 2015). Muutostulkintaan perustuvalla menetelmällä saadaan kuitenkin kartoitettua vain tarkasteltavan ajanjakson aikana kaatuneet puut, joten pidemmälle lahonneen puuston kartoitus vaatisi vuosikymmeniä kattavan ALS-aikasarjan.

Lahopuuinventoinnissa on havaittavissa sama trendi kuin elävän puuston inventoinnissa, jossa kaukokartoitukseen perustuvat inventointimenetelmät ovat korvanneet perinteisiä maastoinventointimenetelmiä. Laajojen alueiden metsävaratiedon tuottamisessa kaukokartoitusaineistoihin perustuvat inventointimenetelmät tuovat kustannussäästöjä, kun kaikkea ei tarvitse mitata maastossa (Holopainen ym. 2014). Maastomittauksia tarvitaan kuitenkin edelleen kaukokartoitusaineiston ja maastotiedon väliseen tilastolliseen riippuvuuteen perustuvaan mallinnukseen sekä erilaisten mallien kalibrointiaineistojen keräämiseen. Lisäksi maastomittaukset ovat toistaiseksi ainoa keino kerätä tarkkaa tietoa lahopuun määrästä ja laadusta.

Vaihtoehto lahopuun perinteiseen maastomittaukseen on metsikkökoealan kolmiulotteista rakennetta kuvaavan tiheän pistepilven tulkinta. Pistepilvi voidaan tuottaa metsän sisältä joko maastolaserkeilaimella tai fotogrammetrisin keinoin. Fotogrammetrisen pistepilvi perustuu digitaaliekuvien stereotulkintaan: tarkasteltavalle pisteelle voidaan määrittää kolmiulotteinen sijainti, kun se havaitaan vähintään kahdesta eri suunnasta otetusta

kuvasta (Lillesand ja Kiefer 1987). Metsikkökoealaa kuvaava tiheä fotogrammetrinen pistepilvi voidaan muodostaa esimerkiksi tavallisella kuluttajakameralla koealan reunoilta kohti keskipistettä otetuista päällekkäisistä kuvista (Liang ym. 2014a).

Toinen, yleisempi tapa metsikkökoealaa kuvaavan tiheän pistepilven tuottamiseen on suunnattuun laseretäisyysmittaukseen perustuva maastolaserkeilaus. Maastolaserkeilauksella tuotettu pistepilvi on fotogrammetrista pistepilveä laadukkaampi, kun etäisyys tarkasteltavaan kohteeseen kasvaa tai kun tarkasteltava kohde on aluskasvillisuuden tai oksiston varjostama (Liang ym. 2014a). Näin sen voisi olettaa soveltuvan fotogrammetrista pistepilveä paremmin myös lahopuun kartoitukseen. Maastolaserkeilauksen on todettu soveltuvan puu- ja koealatasen mittauksiin (Kankare ym. 2015, 2017; Newnham ym. 2015, Liang ym. 2016, Saarinen ym. 2017), mutta tutkimuksissa on toistaiseksi keskitytty vain elävän pystypuuston kartoitukseen. Sen sijaan maastolaserkeilauksen soveltuvuutta lahopuun ja erityisesti maalahopuun koealainventointiin ei ole vielä tutkittu. Tutkimustieto maastolaserkeilaukseen perustuvasta lahopuukartoituksesta on kuitenkin tarpeen perinteisille mittausmenetelmille vaihtoehtoisten maastomittausmenetelmien kehittämiseksi.

### **1.3 Maastolaserkeilaus metsän rakenteen kartoituksessa**

Maastolaserkeilauksessa laserkeilaus tapahtuu metsän sisältä joko kolmijalalta (TLS, Terrestrial Laser Scanning) tai liikkuvalla alustalla (MLS, Mobile Laser Scanning). Tässä tutkielmassa maastolaserkeilauksella tarkoitetaan ensi sijassa TLS-menetelmää. Maastolaserkeilauksessa laseretäisyysmittaus perustuu useimmiten laitteen lähettämän ja kohteesta palaavan lasersäteilyn vaihe-eroon. Kohteelle voidaan määrittää kolmiulotteinen sijainti, kun sen etäisyys ja suunta keilauspisteestä tiedetään. Maastolaserkeilain keilaa ympäristönsä lähes kokonaan pyörähtäen tyypillisesti 180° vaakatasossa ja 310° pystysuunnassa tuottaen ympäristöstään tarkan pistepilvimallin. Yleisimpien maastolaserkeilainten tuottamissa pistepilvissä 10 m etäisyydellä keilaimesta yksittäisten pisteiden välinen etäisyys on noin 6 mm ja pistetiheys noin 25 000 pistettä/m<sup>2</sup>, joka pienenee kohteen ja keilaimen välisen etäisyyden funktiona (Holopainen ym. 2013a). Pistepilven pisteille voidaan määrittää kolmiulotteisen sijainnin lisäksi muitakin ominaisuustietoja kuten kohteesta keilaimelle heijastuvan lasersäteilyn intensiteetti (Kankare 2015).

Maastolaserkeilaimen tuottaman pistepilvimallin millimetritason tarkkuutta hyödynnetään puu- ja koealatasen mittauksissa. Metsän rakenteen kartoituksessa maastolaserkeilausta voidaan käyttää maastokoealamittauksissa ja allometristen mallien laadinnassa. Metsikkökoealaa kuvaavasta TLS-pistepilvestä on mahdollista automaattisesti tunnistaa yksittäiset puut, mitata niiden läpimitta ja pituus sekä määrittellä puun sijainti metsässä (Maas ym. 2008, Liang ym. 2012, 2104b; Raumonon ym. 2013, 2015). Mittausgeometriasta johtuen puun pituuden määrittämisessä on haasteita varsinkin tiheässä metsikössä, jossa latva ei näy kokonaan keilaimelle (Kankare 2015, Liang ym. 2016). Perinteiseen maastomittaukseen verrattuna TLS-aineisto tarjoaa kuitenkin mahdollisuuden mitata ja mallintaa myös tunnuksia, joiden tarkka mittaaminen maastossa perinteisin menetelmin onnistuu vain kaadetusta puusta. Tällaisia ovat esimerkiksi runkokäyrä ja puun tilavuus (Kankare ym. 2013, Liang ym. 2014b, Calders ym. 2015, Saarinen ym. 2017). Puutunusten allometrisessä mallinnuksessa tarvittavan mallinnusaineiston keräämisessä voidaan jatkossa hyödyntää yhä enemmän maastolaserkeilausta. TLS-aineiston merkittävä etu on myös mittausten toistettavuus: pistepilven avulla metsikkökoealalle voidaan palata virtuaalisesti ja mitata sieltä uusia kiinnostavia tunnuksia ilman uusintakäyntiä maastossa. Maastolaserkeilaimella kerätyn pistepilviaineiston laatu vaikuttaa lopulta siihen, miten TLS-aineistoa voidaan hyödyntää metsän rakenteen kartoituksessa. Laatu riippuu ensi sijassa metsän rakenteesta: maastolaserkeilain tuottaa pistepilven vain keilaimelle näkyvistä kohteista, jolloin kasvillisuuden tiheys ja kerroksellisuus aiheuttavat pistepilveen katvealueita (Abegg ym. 2017). Kun TLS-aineistoa kerätään metsikkökoealalta, keilausten katvealueita voidaan vähentää keilaamalla koeala useasta eri pisteestä. Keilausten tuottamat erilliset pistepilvet yhdistetään lopuksi toisiinsa koealalle sijoitettujen referenssipallojen avulla (Holopainen ym. 2013b, Kankare 2015, Wilkes ym. 2017). Pistepilviä voidaan myös käsitellä toisistaan erillisinä, jolloin pistepilvikohtaiset tulokset yhdistetään vasta lopuksi toisiinsa (Liang ym. 2016).

#### **1.4 Tutkimuksen tavoitteet**

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää maastolaserkeilaukseen perustuva automaattinen menetelmä maalahopuun määrän ja laadun kartoitukseen metsikkökoealalta kerätyistä tiheästä pistepilvestä. Maalahopuulla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa maahan kaatuneiden puiden runkoja ja rungon osia. Maalahopuun laadulla tarkoitetaan rungon jä-

reyttä eli läpimittaa rungon puolivälissä. Kehitetyssä menetelmässä koealan maalahopuurungot tunnistetaan pistepilvestä niiden geometrisen muotojen perusteella, ja runkoja kuvaavat pisteet irrotetaan koko koealaa kuvaavasta pistepilvestä. Tämän jälkeen puukohtaisista pistepilvistä määritetään runkojen dimensiot ja lasketaan niistä runkojen tilavuus- ja järeystunnukset. Lopuksi lasketaan maalahopuun määrää ja laatua koealla kuvaavat tunnukset koealalta tunnistettujen maalahopuurunkojen runkotunnusten summina ja keskiarvoina. Maalahopuiden tunnistamisen sekä tilavuus- ja laatutunnusten laskennan automatisoinnin odotetaan nopeuttavan metsikkökoalojen kartoitusta ja mittausta sekä näin parantavan maastolaserkeilauksen sovellettavuutta käytännön sovelluksissa.

Työn keskeisiä tutkimuskysymyksiä ovat:

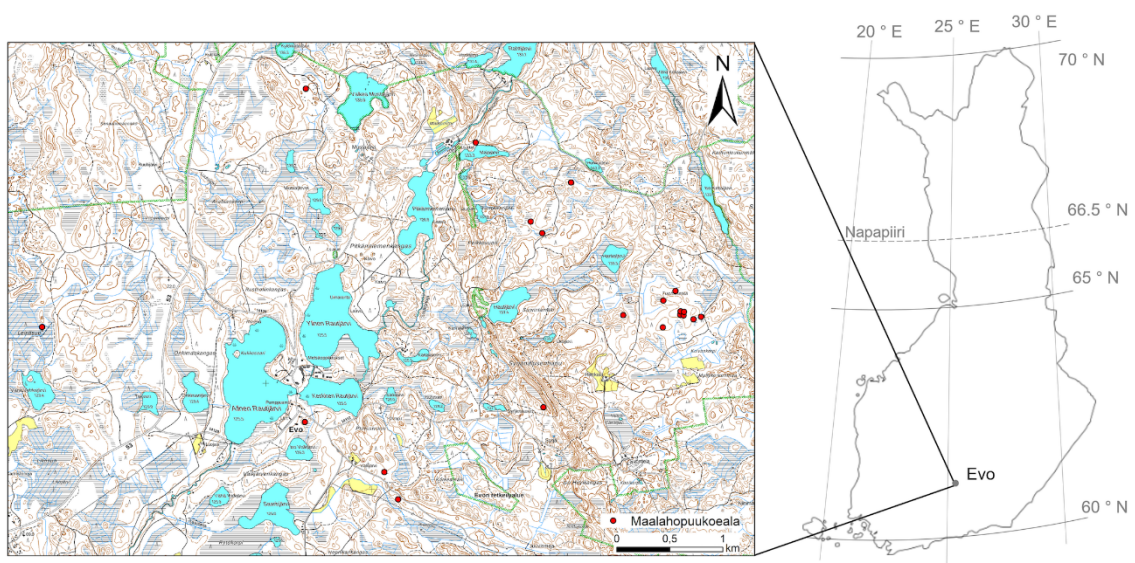
1. Kuinka suuri osuus maalahopuurungoista sekä niiden kokonaistilavuudesta pystytään tunnistamaan TLS-pistepilvestä joko pistepilven visuaaliseen tai automaattiseen tulkintaan kehitetyillä menetelmillä?
2. Mikä on maastolaserkeilaukseen perustuvan kartoitusmenetelmän tarkkuus maalahopuun määrää ja laatua koealatasolla kuvaavien tunnusten määrittämisessä sekä yksittäisten maalahopuurunkojen tilavuus- ja järeystunnusten määrittämisessä?
3. Mitkä tekijät vaikuttavat maastolaserkeilaukseen perustuvan maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuuteen?

## 2 AINEISTOT JA MENETELMÄT

### 2.1 Tutkimuksessa käytettävät aineistot

#### 2.1.1 Tutkimusalue

Tutkimusalue sijaitsee Hämeenlinnassa Evon retkeilyalueella (kuva 1), jonne on perustettu 91 metsikkökoealaa vuonna 2014. Koealat on sijoitettu tutkimusalueelle kattamaan alueen puuston rakenteellisen vaihtelun. Tätä varten tutkimusalue oli jaettu 32 m x 32 m hilaruutuihin, joille oli laskettu lentolaserkeilaukseen perustuvan latvuston korkeusmallin avulla kasvillisuuden keskimääräinen korkeus sekä latvuston tiheys (ks. Yu ym. 2015).



**Kuva 1.** Tutkimusalueen sekä maalahopuun kartoitukseen valittujen koealojen sijainti kartalla.

#### 2.1.2 Maastolaserkeilausaineiston kerääminen metsikkökoealoilta

Metsikkökoealoilta oli kerätty maastolaserkeilausaineisto keväällä 2014. Kukin 32 m x 32 m koeala oli keilattu viidestä pisteestä: ensimmäinen keilauspiste sijaitsi koealan keskipisteessä ja neljä muuta keilauspistettä sen ympärillä (kuva 2). Keilausten tuottamat erilliset pistepilvet oli yhdistetty toisiinsa koealalle sijoitettujen referenssipallojen avulla. Referenssipallot oli kiinnitetty magneeteilla puiden runkoihin noin 2 m korkeudelle maasta ruuvattuihin laattoihin, joiden tarkat sijainnit oli määritelty takymetrin avulla. Referenssipalloja oli koealalla puuston tiheydestä riippuen 5–6, jotka tuli kaikki näkyä koe-

alan keskipisteeseen ja joista vähintään kolme tuli näkyä kerrallaan muihin keilauspisteisiin. Näin pistepilvet oli voitu rekisteröidä eli muut keilaukset yhdistää keskipistekeilaukseen ja edelleen kääntää koealan sisäisestä koordinaatistosta ulkoiseen koordinaatistoon.

### **2.1.3 Pystyvuuston mittaus metsikkökoeloilta**

Maastolaserkeilausaineiston keruun jälkeen metsikkökoeloilta oli mitattu maastossa rinnankorkeusläpimitaltaan vähintään 5 cm paksut puut kesällä 2014. Puiden sijainnit oli määritetty joko tunnistamalla puu koealan TLS-pistepilvestä tai paikantamalla se tunnettujen puiden sijaintien avulla maastossa. Maastossa puille oli mitattu rinnankorkeusläpimita ja pituus sekä määritelty puulaji. Puiden runkotilavuudet oli tämän jälkeen johdettu rinnankorkeusläpimitan ja pituuden avulla Laasasenahon (1982) puulajikohtaisilla tilavuusmalleilla. Lopuksi puuston rakennetta koealatasolla kuvaavat puustotunnukset oli laskettu metsikkökoelan puiden puutunnusten summina tai pohjapinta-alalla painotettuina keskiarvoina.

### **2.1.4 Metsikkökoeloiden valinta maalahopuun kartoitusta varten**

Metsikkökoeloista valittiin uudelleen keilattavaksi 20 koealan otos maalahopuun kartoitusta varten. Otanta perustui vuonna 2014 kerättyjen TLS-pistepilvien visuaaliseen tulkintaan: koeala luettiin otokseen, jos sitä kuvaavassa pistepilvessä havaittiin maahan kaatuneita tai katkenneita järeitä runkoja tai rungon osia. Maalahopuuta sisältäviä koeloidja valittiin rakenteeltaan erilaisista metsiköistä (taulukko 1). Otokseen kuului koeloidja niin luonnontilaisista kuin myös talouskäytössä olevista metsiköistä, joissa pystyvuuston keskiläpimitan vaihteluväli oli vuoden 2014 maastomittausten perusteella 19,0–42,7 cm ja keskipituuden vaihteluväli 18,7–31,3 m. Vastaavasti puuston pohjapinta-ala oli koeloidilla 15,2–42,9 m<sup>2</sup>/ha, runkotilavuus 177,7–507,7 m<sup>3</sup>/ha ja runkoluku 342–2041 kpl/ha (taulukko 1). Metsikkökoeloidjen pääpuulaji määriteltiin elävän puuston pohjapinta-alan mukaan, ja se oli 16 koeloidilla kuusi (*Picea abies* (L.) H. Karst.), kahdella koeloidilla mänty (*Pinus sylvestris* L.), yhdellä koeloidilla hieskoivu (*Betula pubescens* L.) ja yhdellä koeloidilla siperianlehtikuusi (*Larix sibirica* Ldb.).

**Taulukko 1.** Puustotunnusten vaihtelu maalahopuun kartoitukseen valituilla metsikkö-koaloilla ( $N = 20$ ). Pystypuuston rakennetta koelatasolla kuvaavat pohjapinta-alalla painotetut keskiläpimitta ( $D_g$ ) ja keskipituus ( $H_g$ ) sekä puuston pohjapinta-ala ( $G$ ), runkotilavuus ( $V$ ) ja runkoluku ( $N$ ), jotka perustuvat vuoden 2014 maastomittauksiin.

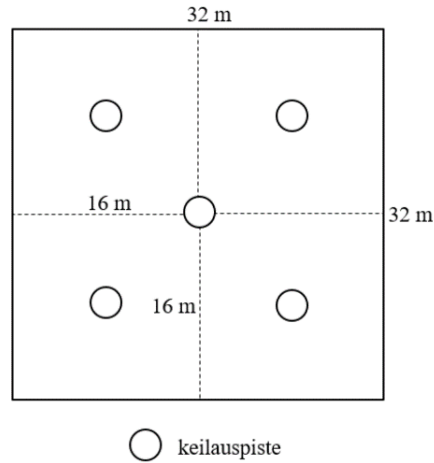
	$D_g$ (cm)	$H_g$ (m)	$G$ (m <sup>2</sup> /ha)	$V$ (m <sup>3</sup> /ha)	$N$ (kpl/ha)
<i>minimi</i>	19,0	18,7	15,2	177,7	342
<i>keskiarvo</i>	31,6	25,0	29,9	341,7	728
<i>maksimi</i>	42,7	31,3	42,9	507,7	2041
<i>keskihajonta</i>	7,4	4,1	6,9	102,9	392

### 2.1.5 Maastolaserkeilausaineiston kerääminen maalahopuun kartoitukseen

Maalahopuun kartoitukseen valituilta koaloilta kerättiin maastolaserkeilausaineisto loka–marraskuussa 2017 Leica HDS6000 -vaihe-erokeilaimella (Leica Geosystems, Heerbrugg, Sveitsi) high power -asetuksin. Tällöin keilaimen tuottamassa pistepilvessä pisteiden välinen etäisyys oli 10 m etäisyydellä keilaimesta 6,3 mm ja pistetiheys noin 25 000 pistettä/m<sup>2</sup>. Maastolaserkeilausaineisto kerättiin koaloilta samalla tavalla kuin vuonna 2014. Kukin koala keilattiin viidestä eri keilauspisteestä (kuva 2), ja keilausten tuottamat erilliset pistepilvet yhdistettiin toisiinsa referenssipallojen avulla, jotka kiinnitettiin magneeteilla samoihin laattoihin kuin edelliselläkin keilauskerralla. Referenssipallojen kiinnityslaattoja ei oltu välillä poistettu puista, joten niiden sijainteja ei tarvinnut uudestaan määrittää. Referenssipallot numeroitiin juoksevasti pistepilven rekisteröintiä varten kiinnittämällä niihin valkoiseen paperiin mustalla tussilla piirretty numero. Näin pallot voitiin helposti tunnistaa pistepilvistä, kun pisteet värjättiin keilaimelle palanneen lasersäteilyn intensiteetin mukaisesti.

Maastolaserkeilausaineiston keruun jälkeen pistepilvet rekisteröitiin, suodatettiin ja rajattiin. Pistepilvien rekisteröinnissä käytettiin Z + F LaserControl -ohjelmistoa (Zoller + Fröhlich GmbH, Wangen im Allgäu, Saksa), jolla referenssipallot etsittiin koalan pistepilvistä. Referenssipalloja kuvaaviin pisteisiin sovitettiin saman kokoiset pallon muotoiset objektit, jotka numeroitiin referenssipallojen numeroinnin mukaisesti. Tunnistettujen referenssipallojen sijainteja kuvaavien pallo-objektien avulla voitiin laskea pistepilvien välinen 3D-transformaatio eli neljän muun keilauksen tuottaman pistepilven siirto ja kierto koalan keskipisteestä keilattuun pistepilveen nähden. Näin pistepilvet yhdistettiin toisiinsa keskimäärin 1,7 mm tarkkuudella. Lisäksi pistepilviä suodatettiin kohinan poistamiseksi. Referenssipallojen tarkkojen sijaintien avulla pistepilvet käännettiin ulkoiseen

koordinaatistoon ja rajattiin kattamaan vain metsikkökoealat. Suodatetussa ja rajatussa koealakohtaisessa pistepilvessä oli puuston rakenteesta riippuen 104–150 miljoonaa pistettä.



**Kuva 2.** Maastolaserkeilauspisteiden ohjeellinen sijainti koealalla. Keilauspisteiden sijainneissa symmetriaa tärkeämpää oli koko koealaa kuvaavan pistepilven laatu: muut keilauspisteet sijoitettiin koealan keskipisteen ympärille siten, että koealan kaikki keilaukset yhdistävään pistepilveen tuli katvealueita mahdollisimman vähän.

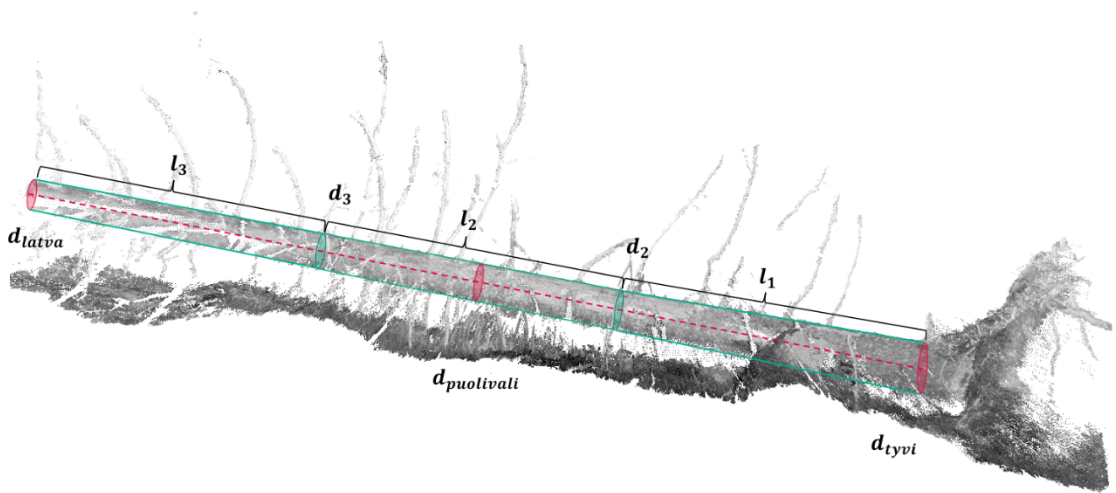
### 2.1.6 Maalahopuun mittaukset metsikkökoealoilta

Maalahopuun kartoitukseen valituilta metsikkökoealoilta mitattiin TLS-aineiston keruun yhteydessä maalahopuun määrä ja laatu TLS-menetelmän kehitystä ja tarkkuuden arviointia varten. Mittausaineistoon luettiin mukaan kaikki koealalla olevat maalahopuurungot, joilla rungon keskikohdan läpimitta oli vähintään 5 cm. Maalahopuurungoille määriteltiin VMI:n maastotyöohjeen (Valtakunnan metsien ... 2009) mukaisesti puulaji, kuoren peittävyys, rungon ulkoasu ja puun lahoaste. Rungot luokiteltiin kuoren peittävyysprosentin mukaan 20 %:n tasaaviin luokkiin sekä rungon ulkoasun mukaan kolmeen luokkaan (juurineen kaatunut, katkennut tai hakkuutähde). Puun lahoaste määritettiin runkoon painetun puukon avulla viisiportaisella asteikolla: Puuainekseltaan kovaan puuhun puukon terä tunkeutui vain muutaman millimetrin, melko kovaan puuhun 1–2 cm, melko pehmeään puuhun 3–5 cm ja pehmeään puuhun kokonaan. Hyvin pehmeä puuaines oli sormin hajoavaa ja pääasiassa epifyyttien peittämää. Maalahopuun tilavuuden määrittämiseksi mitattiin koealalla olevien maapuurunkojen ja -rungonosien pituudet sekä läpimitat tyvestä, latvasta ja rungon keskikohdasta mittanauhan ja läpimittasaksien avulla. Lisäksi yli 4 m pituisista rungoista mitattiin läpimitat 2 m välein (kuva 3). Rungon tilavuus määritettiin läpimitta-pituushavaintojen perusteella Huberin kaavalla:



$$V = \sum_{i=1}^n A_{m_i} l_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi l_i}{16} (d_i + d_{i+1})^2 \quad (1)$$

jossa  $A_{m_i}$  on rungonosan  $i$  keskiosan poikkileikkausala,  $l_i$  rungonosan  $i$  pituus,  $n$  rungonosien lukumäärä,  $d_i$  rungonosan  $i$  tyviläpimitta ja  $d_{i+1}$  rungonosan  $i$  latvaläpimitta. Maalahopuurungon järeys määriteltiin rungon keskikohdan läpimittana. TLS-menetelmän tarkkuuden arviointia varten maastossa mitatut maalahopuurungot numeroitiin ja niiden sijainti piirrettiin koalan puukarttaan, joka oli valmistettu vuoden 2014 TLS- ja maastokoalamittausten perusteella.



**Kuva 3.** Maalahopuurungosta maastossa mitattavat tunnuksat tilavuuden (ks. kaava 1) ja järeyden määrittämiseksi: kokonaispituus sekä läpimitat tyveltä, latvasta ja rungon keskikohdasta sekä 2 m välein tyveltä alkaen. Kuva koalan pistepilvestä leikatusta maalahopuurungosta, jossa pisteet on värjätty keilaimelle palaavan lasersäteilyn intensiteettiarvon perusteella.

Yli 5 cm järeän maalahopuun tilavuus oli koaloilla 2,8–61,4 m<sup>3</sup>/ha (taulukko 2). Eniten maalahopuuta oli luonnontilaisissa vanhoissa metsissä ja vähiten talouskäytössä olevissa varttuneissa kasvatusmetsissä. Maalahopuurunkoja tai -rungonosia oli koaloilla 49–479 kpl/ha (taulukko 2). Rungoista 70 % oli katkenneita runkoja tai rungonosia, 15 % oli juurineen kaatuneita ja 15 % hakkuutähteitä. Valtaosa (66 %) rungoista oli pystytuuston tavoin kuusia, koivuja oli 19 % ja mäntyjä 10 %. Viidesosalla rungoista kuoren peittävyys oli 0–20 %, toisella viidesosalla 20–80 % ja kolmannella viidesosalla 80–100 %. Lopuilla kahdella viidesosalla runko oli sammaleen peitossa. Taulukossa 3 on esitetty tarkemmin maalahopuurunkojen pituus-, järeys- ja tilavuustunnusten vaihtelu sekä järeysjakauma koko tutkimusaineistossa.

**Taulukko 2.** Yli 5 cm järeän maalahopuun määrää ja laatua koealatasolla kuvaavien tunnusten vaihtelu maalahopuun kartoitukseen valituilta metsikkökoealoilta: maalahopuunrunkojen kokonaistilavuus ( $V$ ), runkoluku ( $N$ ) ja maalahopuun tilavuuden osuus pystytuuston tilavuudesta (laho-%) sekä maalahopuurunkojen keskijäreys ( $d_m$ ), -pituus ( $l_m$ ) ja -tilavuus ( $v_m$ ).

	$V$ (m <sup>3</sup> /ha)	$N$ (kpl/ha)	laho-%	$d_m$ (cm)	$l_m$ (m)	$v_m$ (dm <sup>3</sup> )
<i>minimi</i>	2,8	49	1,0	6,9	3,3	10,7
<i>keskiarvo</i>	25,3	150	7,4	14,3	7,6	192,6
<i>maksimi</i>	61,4	479	25,3	21,0	11,6	460,3
<i>keskihajonta</i>	18,6	97	5,8	3,8	2,2	127,8

**Taulukko 3.** Maalahopuun kartoitukseen valituilta metsikkökoealoilta maastossa mitattujen, yli 5 cm järeiden maalahopuurunkojen ( $N = 304$ ) pituus-, järeys- ja tilavuustunnusten vaihtelu sekä järeysluokkajakauma.

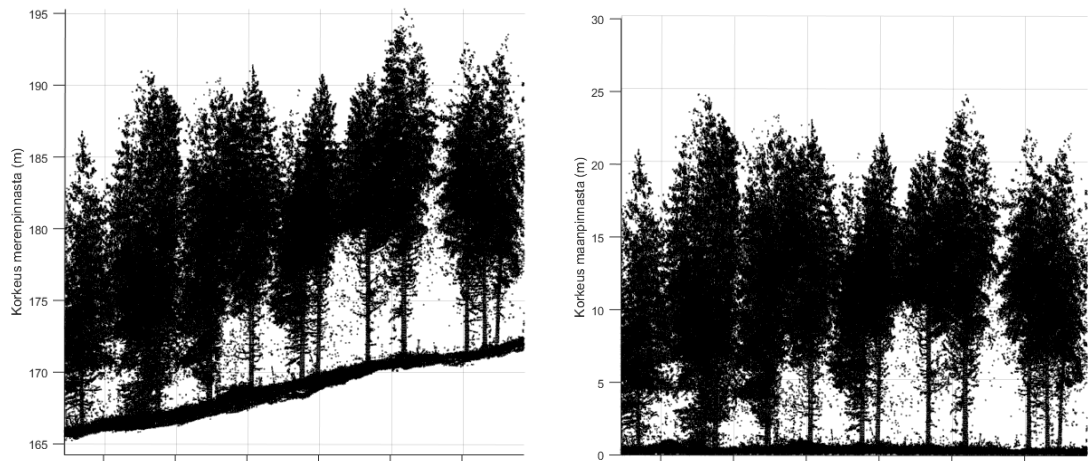
	järeys (cm)	pituus (m)	tilavuus (dm <sup>3</sup> )				
<i>minimi</i>	5,0	0,9	3,4				
<i>keskiarvo</i>	13,3	7,2	170,5				
<i>mediaani</i>	10,5	5,9	48,7				
<i>maksimi</i>	39,5	28,0	2550,0				
<i>keskihajonta</i>	7,7	5,4	316,8				
<b>järeysluokka (cm)</b>	<b>5–10</b>	<b>10–15</b>	<b>15–20</b>	<b>20–25</b>	<b>25–30</b>	<b>30–35</b>	<b>35–40</b>
<i>n</i>	142	71	33	29	13	12	4
<i>osuus rungoista (%)</i>	46,7	23,4	10,9	9,5	4,3	3,9	1,3
<i>osuus tilavuudesta (%)</i>	7,0	13,1	12,5	24,7	17,2	21,7	3,8

## 2.2 Maalahopuun määrän ja laadun kartoitus TLS-pistepilvestä

### 2.2.1 TLS-pistepilven esikäsittely

Maastolaserkeilaukseen perustuva maalahopuun kartoitusmenetelmä kehitettiin MATLAB-ohjelmistolla (The MathWorks Inc, Natick, Massachusetts, Yhdysvallat). Maalahopuurunkojen tunnistamista varten pistepilven pisteiden korkeudet normalisoitiin ensin korkeuksiksi maanpinnasta, sillä TLS-aineistossa kaikkien pisteiden z-koordinaatit ovat suhteessa määriteltyyn nollassoon, joka on useimmiten merenpinnantaso (kuva 4). Korkeuksien normalisointia varten muodostettiin maanpinnan tasoa kuvaava maastomalli jakamalla koealan pistepilvi xy-tasossa 0,5 m x 0,5 m hilaruutuihin ja etsimällä ruutuihin osuneista pisteistä alimmat korkeuspisteet, joiden z-koordinaattien arvot tallennettiin ruutujen keskipisteiden z-koordinaateiksi.

Maanpinnan korkeutta kuvaavia maanpintapisteitä suodatettiin naapurustoanalyysin avulla poistamalla pisteet, joiden keskimääräinen etäisyys neljään naapuripisteeseen oli yli 0,55 m. Poistetuille maanpintapisteille estimoitiin z-koordinaatit interpoloimalla viereisten pisteiden z-koordinaattien avulla, ja lopuksi suodatettujen maanpintapisteiden korkeudet vielä tasoitettiin 3 x 3 keskiarvosuodattimella, jossa solukoko oli maastomallin tapaan 0,5 m. Pistepilven pisteiden z-koordinaatit normalisoitiin korkeuksiksi maanpinnasta etsimällä jokaiselle pisteelle xy-tasossa lähin maanpintapiste ja vähentämällä maanpintapisteen z-koordinaatin arvo tarkastelupisteen z-koordinaatin arvosta. Normalisoidusta pistepilvestä valittiin maalahopuun automaattista kartoitusta varten kaikki pisteet korkeusväliltä 0,15–1,0 m, joka määritettiin menetelmän kehittämisvaiheessa herkkyysanalyysin avulla.



**Kuva 4.** Pisteiden z-koordinaattien normalisointi korkeuksista merenpinnasta (vas.) korkeuksiin maanpinnasta (oik.). Korkeusnormalisoidusta pistepilvestä valittiin maalahopuun automaattista kartoitusta varten pisteet korkeusväliltä 0,15–1,0 m.

### 2.2.2 Maalahopuurunkojen automaattinen tunnistaminen TLS-pistepilvestä

Maalahopuurungot tunnistettiin pistepilvestä automaattisesti niiden geometrinen muotojen perusteella. Maahan kaatuneet rungot erottuivat ympäröivästä maastosta pitkinä ja säännöllisinä sylinterin muotoisina kohoumina, joiden tunnistamisessa käytettiin sylinterisovitusta, pistepilvestä muodostettua pintamallia sekä erilaisia kuvankäsittely- ja segmentointimenetelmiä. Tunnistamisessa oli tavoitteena selvittää maalahopuurungon tyven ja latvan sijainnit, joiden avulla runko voitiin rajata koealan pistepilvestä omaksi pistepilvekseen rungon tilavuus- ja laatutunnusten määrittystä varten. Maalahopuurunkojen automaattinen tunnistusprosessi oli nelivaiheinen:

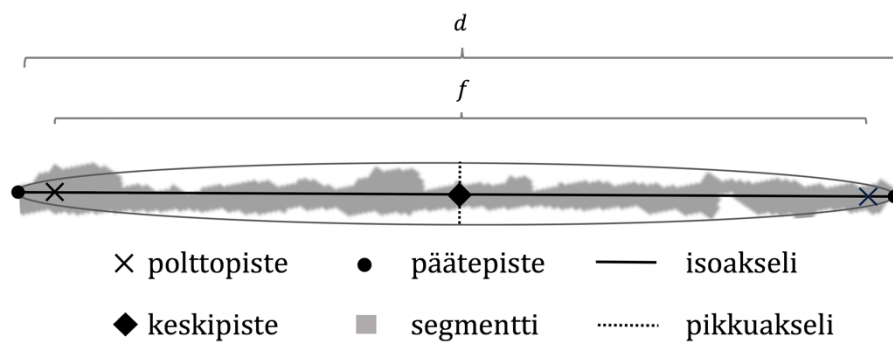
1. pistepilven sylinterisuodatus,

2. suodatetun pistepilven muuttaminen pintamalliksi,
3. pintamallin segmentointi sekä
4. maalahopuurunkojen sijaintien määrittäminen ja irrotus pistepilvestä.

Ensimmäisessä vaiheessa pistepilvestä pyrittiin löytämään maalahopuurunkoja kuvaavat sylinterin muotoiset rakenteet. Tätä varten pistepilvi jaettiin xy-tasossa 0,5 m x 0,5 m ruutuihin, ja jokaisen ruudun pisteisiin sovitettiin sylinteri. Sylinterin sovitus perustui RANSAC-algoritmiin (Random Sample Consensus, ks. Bolles ja Fischler 1981), jolla voidaan estimoida matemaattisen mallin parametrit runsaasti poikkeavia havaintoja sisältävästä aineistosta. Maalahopuurunkojen tunnistuksen kannalta poikkeavat havainnot (eng. *outlier*) ovat pistepilvessä maalahopuurunkojen sijaan esimerkiksi oksia, aluskasvillisuutta, kiviä ja maanpintaa kuvaavat pisteet. RANSAC-algoritmiin perustuvassa sylinterin sovituksessa toistetaan iteratiivisesti kaksivaiheista prosessia. Ensimmäisessä vaiheessa valitaan pistejoukosta satunnainen otos, johon sovitetaan sylinteri. Toisessa vaiheessa tutkitaan, miten hyvin satunnaiseen otokseen sovitettu sylinteri kuvaa pistejoukon muita pisteitä. Enimmäisetäisyydellä sovitetun sylinterin vaipasta sijaitsevat pisteet (eng. *inlier*) muodostavat ns. konsensusjoukon (eng. *consensus set*), ja iterointia toistetaan, kunnes konsensusjoukkoon kuuluvien pisteiden osuus vastaa haluttua luotettavuustasoa.

Pistepilven sylinterisuodatuksessa hilaruudun rajaamaan pistejoukkoon sovitettavan sylinterin pohjan läpimitan vaihteluväli rajoitettiin maalahopuun läpimitan oletetulle vaihteluvälille (5–70 cm). Lisäksi sylinterin orientaation eli pohjien keskipisteiden kautta kulkevan suoran suuntavektorin sallittiin poikkeavan horisontaalisesta suunnasta enintään 30°. Yli 1,5 cm etäisyydellä sylinterin vaipasta sijaitsevat pisteet rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Sylinterisuodatettu pistepilvi muutettiin tunnistuksen toisessa vaiheessa pintamalliksi projisoimalla pisteet xy-tasolle ja muodostamalla pisteistä tiheysrasteri, jossa solun koko oli 2 cm x 2 cm. Rasterisolujen arvot laskettiin soluun kuuluneiden pisteiden lukumääränä. Tiheysrasteri muutettiin pintamallin segmentointia varten binäärikuvaksi siten, että pikseli sai uudelleenluokituksessa arvon yksi, jos rasterisoluun oli osunut vähintään neljä pistettä. Muutoin pikseli sai arvon nolla. Lisäksi kuvaa käsiteltiin morfologisin sulku- ja avausoperaatioin (esim. Beyerer ym. 2016), ja kuvasta poistettiin alle 30 pikselin muodostamat yhtenäiset alueet, jotta mahdollisesti maalahopuurunkoja tai niiden osia kuvaavat pikselijoukot erottuivat paremmin muusta ympäristöstään (kuva 6).

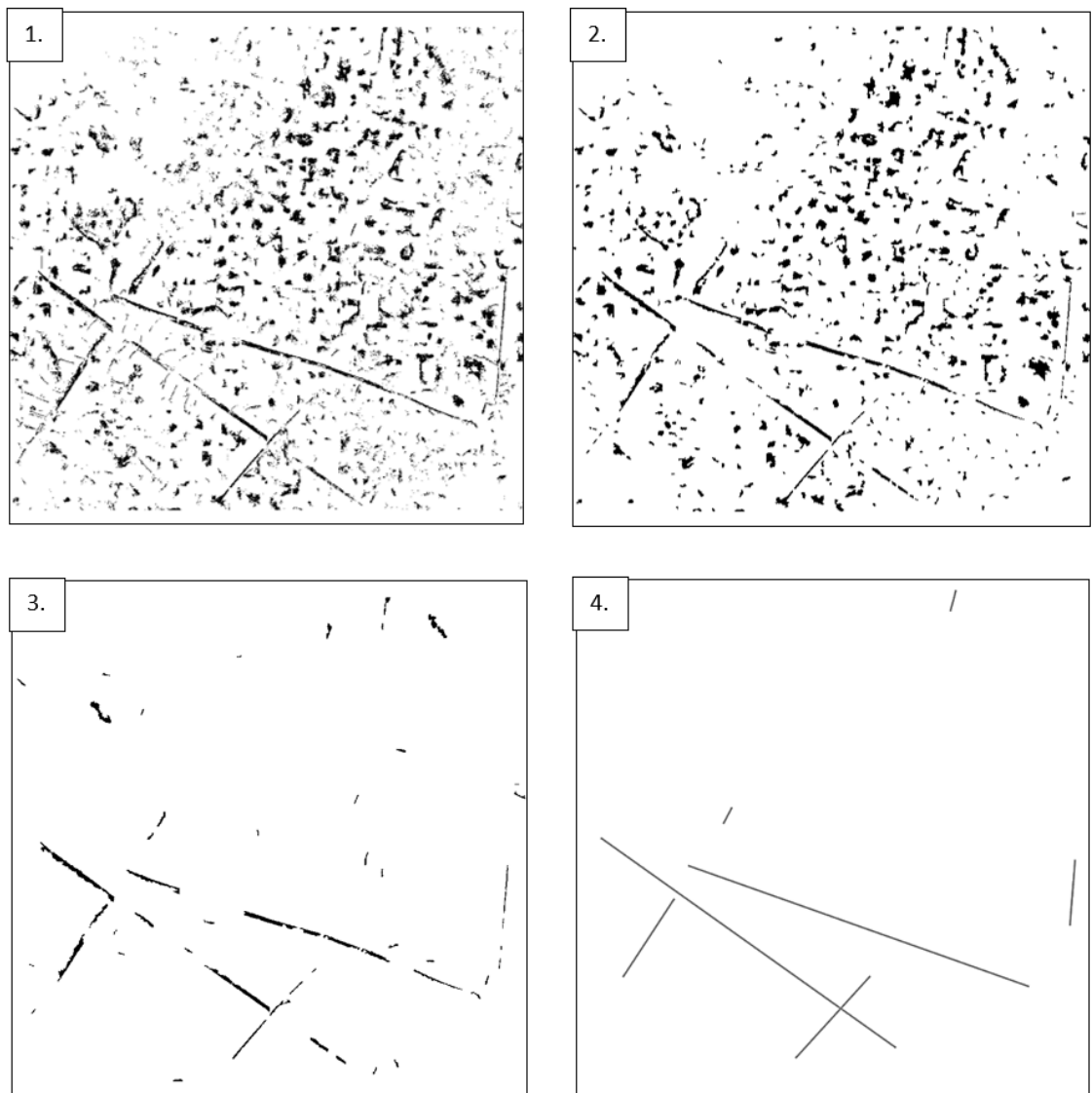
Tunnistuksen kolmannessa vaiheessa binäärikuva segmentoitiin vierekkäisten pikselien muodostamiin yhtenäisiin alueisiin, jotka luokiteltiin maalahopuurunkoja tai niiden osia kuvaaviin sekä muuta maastoa kuvaaviin segmentteihin. Luokittelussa hyödynnettiin segmenttien geometriaa, sillä maalahopuurunkoja kuvaavat segmentit ovat voimakkaasti elliptisiä eli niiden pituus on moninkertainen leveyteen verrattuna. Luokittelua varten segmenteille laskettiin ellipsin epäkeskisyys eli polttopisteiden välisen etäisyyden suhde isoakselin pituuteen (kuva 5). Segmentti luokiteltiin maalahopuurunkoja tai niiden osia kuvaavaksi, jos sen epäkeskisyysarvo oli vähintään 0,98 eli segmentti oli voimakkaasti elliptinen ja jos sen isoakselin pituus oli vähintään 0,5 m (kuva 6, taulukko 4).



**Kuva 5.** Kuvasegmentin geometriaa kuvataan ellipsillä, jolla on kaksi polttopistettä. Polttopisteiden kautta kulkeva kuvasegmentin pituinen jana on isoakseli, jonka keskipisteen kautta kulkeva pikkuakseli on kohtisuorassa isoakseliin nähden. Segmentin elliptisyyttä kuvaava epäkeskisyys lasketaan ellipsin polttopisteiden välisen etäisyyden  $f$  ja isoakselin pituuden  $d$  suhteena.

Maalahopuurunkojen tunnistuksen neljännessä vaiheessa määriteltiin runkojen tyvi- ja latvasijainnit pintamallisegmenttien isoakseleita kuvaavien janojen avulla. Koska segmentti kuvaa joko kokonaista maalahopuurunkoa tai sen osaa, samaa runkoa kuvaavat rungonosasegmentit yhdistettiin ennen tyvi- ja latvasijaintien määrittämistä. Yhdistämistä varten segmenteille laskettiin isoakselin ja koealan x-akselin välinen kulma sekä isoakselin keskipiste, joiden avulla määriteltiin segmenttiä kuvaavan janan päätepisteet (kuva 5). Jana B yhdistettiin janaan A, jos janojen A ja B keskipisteiden kautta kulkevan suoran ja janan A välinen kulma oli enintään  $7^\circ$  ja jos janojen välinen etäisyys oli enintään 4 m. Kun edellä mainitut ehdot täyttäviä toisiinsa yhdistettäviä janoja ei enää ollut, vähintään 1 m pituisten janojen oletettiin kuvaavan maalahopuurunkojen sijainteja koealalla (kuva 6).

Lopuksi koealan alkuperäisestä korkeusnormalisoidusta pistepilvestä rajattiin tunnistettuja maalahopuurunkoja kuvaavat pisteet omiksi pistepilvikseen maalahopuurungon tilavuus- ja laatutunnusten laskentaa varten. Pisteiden rajausta tehtiin pintamallisegmenttien leveyksien perusteella: tarkastelun ulkopuolelle rajattiin pisteet, joiden etäisyys kustakin maalahopuurunkoa kuvaavasta janasta oli suurempi kuin segmentin isoakselia vastaan kohtisuorassa olevan pikkuakselin (ks. kuva 5) pituus. Maalahopuurunkojen tunnistamisen eri vaiheissa käytetyt parametrit on koottu arvoineen taulukkoon 4.



**Kuva 6.** Pintamallin segmentointiin perustuvan maalahopuurunkojen automaattisen tunnistuksen vaiheet 32 m x 32 m koealalta: Tunnistuksen ensimmäisessä vaiheessa suodatettu pistepilvi projisoitiin xy-tasolle 2 cm x 2 cm pintamalliksi ja muutettiin binäärikuvaksi (1). Kuvaa käsiteltiin morfologisin sulku- ja avausoperaatioin sekä segmentoitiin vierekkäisten pikselien muodostamiin yhtenäisiin alueisiin (2). Voimakkaasti elliptiset segmentit luokiteltiin maalahopuurungoiksi tai niiden osiksi (3), joista muodostettiin maalahopuurunkojen sijainteja kuvaavat janat yhdistämällä saman suuntaiset peräkkäiset segmentit toisiinsa (4).

### 2.2.3 Maalahopuurunkojen visuaalinen tunnistaminen TLS-pistepilvestä

Automaattisen tunnistuksen lisäksi maalahopuruungot tunnistettiin manuaalisesti koealan pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä. Visuaalinen tunnistus tehtiin pistepilven rajauksen yhteydessä Terrascan-ohjelmistolla (Terrasolid Oy, Helsinki), jossa ensin koealan pistepilven pisteet värjättiin keilaimelle palanneen säteilyn intensiteettiä mukana. Sitten pistepilveen sovittiin janoit kuvaamaan pistepilvestä havaittujen maalahopuurunkojen sijainteja koealalla. Lopuksi janojen päätepisteiden koordinaatit siirrettiin tekstitiedostona MATLAB-ohjelmistoon, jossa runkoja kuvaavat osat pistepilvestä rajattiin automaattisen menetelmän tavoin omiksi pistejoukoiksi rungon tilavuus- ja laatutunnusten laskentaa varten.

**Taulukko 4.** Maalahopuun kartoitusmenetelmän eri työvaiheissa käytetyt parametrit.

<i>työvaihe / parametri</i>	<i>parametrin arvo</i>
<b>TLS-pistepilven esikäsittely</b>	
1. Maastomallin muodostus	
– <i>maastomallin resoluutio</i>	0,5 m x 0,5 m
– <i>maanpintapisteiden keskimääräinen etäisyys 4 naapurista</i>	≤ 0,55 m
2. Pistepilven rajausta korkeussuunnassa	
– <i>alarajan korkeus maanpinnasta</i>	0,15 m
– <i>ylärajan korkeus maanpinnasta</i>	1 m
<b>Runkojen automaattinen tunnistus pistepilvestä</b>	
1. Pistepilven sylinterisuodatus	
– <i>suodatushilan koko</i>	0,5 m x 0,5 m
– <i>sylinterin läpimitan alaraja</i>	5 cm
– <i>sylinterin läpimitan yläraja</i>	70 cm
– <i>sylinterin orientaation sallittu poikkeama vaakatasosta</i>	≤ 30 °
– <i>suodatettujen pisteiden etäisyys sylinterin vaipasta</i>	≤ 1,5 cm
2. Pintamallin muodostus ja segmentointi	
– <i>pintamallin resoluutio</i>	2 cm x 2 cm
– <i>pintamallista binäärikuvaksi – pikseliarvojen uudelleenluokitus</i>	≥ 4 pistettä/pikseli
3. Maalahopuurunkoja kuvaavien segmenttien tunnistus pintamallista	
– <i>segmentin pinta-ala</i>	≥ 30 pikseliä
– <i>segmentin elliptisyys (epäkeskisyys)</i>	≥ 0,98
– <i>segmentin pituus</i>	≥ 0,5 m
– <i>toisiinsa yhdistettävien rungonosien välinen kulma</i>	≤ 7 °
– <i>toisiinsa yhdistettävien rungonosien välinen etäisyys</i>	≤ 4 m
<b>Maalahopuun tilavuus- ja laatutunnusten määrittäminen</b>	
1. Runkopisteiden suodatus	
– <i>pinnan normaalin ja rungon pituusakselin välinen kulma</i>	≤ 5 °
2. Läpimitta-pituus -havaintojen suodatus ja tasoitus	
– <i>sallittu poikkeama läpimittojen keskiarvosta</i>	≤ keskihajonta
– <i>kuutiosplinfunktion tasoitusparametri</i>	0,5

#### 2.2.4 Maalahopuun tilavuus- ja laatutunnusten määrittäminen

Pistepilvestä irrotetulle maalahopuurungolle määritettiin pituus sekä läpimitat rungon tilavuuden ja järeyden määrittämistä varten. Maalahopuurungon pituus laskettiin suoraan tyvi- ja latvapisteiden välisenä etäisyytenä. Läpimittojen määrittämisessä oli kaksi vaihetta:

1. maalahopuupistepilven suodatus sekä
2. sylinterisovitukseen perustuva läpimittojen estimointi.

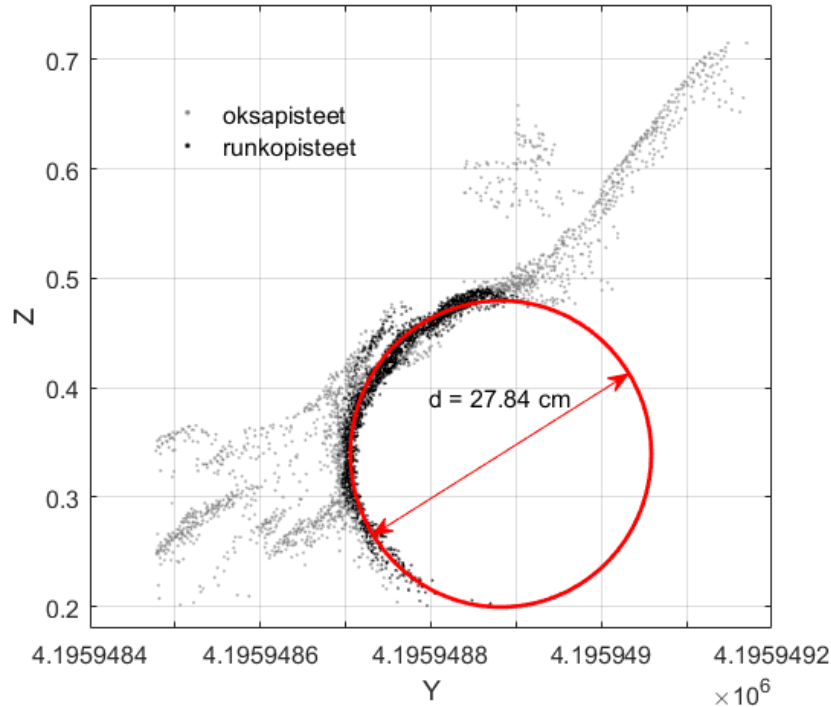
Ensimmäisessä vaiheessa maalahopuupistepilvien pisteitä suodatettiin läpimittaestimointia varten siten, että oletettavasti muuta kuin runkoa kuvaavat pisteet rajattiin tarkastelun ulkopuolelle. Suodatusta varten pisteille laskettiin 30 naapuripisteen muodostaman pinnan normaalin suuntavektorit, jotka ovat runkoa kuvaavilla pisteillä lähes kohtisuorassa rungon pituusakseliin nähden. Runkopisteiksi luokiteltiin pisteet, joilla pinnan normaalivektorin sekä rungon pituusakselin normaalivektorin välinen kulma oli alle  $5^\circ$ .

Toisessa vaiheessa runkokohtaisista maalahopuupistepilvistä mitattiin runkojen läpimitat 10 cm:n välein. Läpimitan mittaaminen perustui rungon pituusakselin suuntaisen sylinterin sovittamiseen pistepilvestä leikattuun, rungon pituussuunnassa 15 cm pituiseen pistepilvileikkaukseen. Läpimitta kussakin mittauskohdassa saatiin pistepilvileikkauksen runkopisteisiin sovitettuna sylinterin pohjan läpimitana (kuva 7). Läpimita-pituus -havaintoja suodatettiin poistamalla selkeästi muista poikkeavat havainnot, joilla pistepilvestä mitattu läpimita poikkesi läpimittojen keskiarvosta yli keskihajonnan verran. Suodatettuja läpimita-pituus -havaintoja tasoitettiin ja puuttuvat läpimitat interpoloitiin kuutiosplinitasointifunktiolla (kuva 8). Kuutiosplinitasointituksessa tasoituksen voimakkuus määritetään tasoitusparametrin  $p$  avulla: kun  $p = 1$ , tasoituskäyrä kulkee kaikkien havaintojen kautta, ja kun  $p = 0$ , tasoituskäyrä on havaintoihin pienimmän neliösumman menetelmällä sovitettu suora. Tasoitusparametrin arvojen 0,4–0,6 on havaittu soveltuvan parhaiten puun rungolta mitattujen läpimittojen tasoitukseen (Saarinen ym. 2017), joten tässä tutkimuksessa maalahopuurunkojen läpimita-pituus -havaintojen tasoituksessa käytettiin tasoitusparametrina arvoa 0,5.

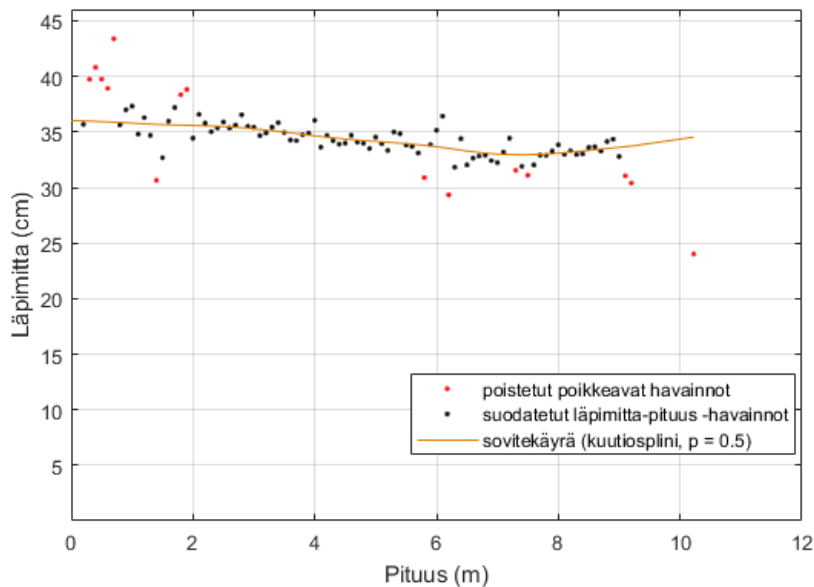
Läpimittojen määrittämisen jälkeen laskettiin maalahopuurungon tilavuus- ja järeydennäköiset sekä maalahopuun määrää ja laatua koealatasolla kuvaavat tunnuksien arvot. Rungon tilavuus määritettiin Huberin kaavalla (kaava 1) ja järeyden arvot rungon keskikohdan läpimitana. Koealalta tunnistettujen maalahopuurunkojen tunnusten summina ja keskiarvoina saatiin



edelleen estimaatit maalahopuun kokonaistilavuudelle sekä keskimääräiselle rungon järeydelle, pituudelle ja tilavuudelle. Lisäksi muodostettiin maalahopuun järeysjakauma kuvaamaan maalahopuun määrää ja laatua koko tutkimusalueella.



**Kuva 7.** Maalahopuurungon läpimitan määrittäminen perustuu rungon pistepilvileikkaukseen sovitettavan sylinterin pohjan läpimittaan. Sylinteri sovitetaan pistepilven suodatuksessa luokiteltuihin runkopisteisiin. Kuvassa eräästä maalahopuupistepilvestä leikatut ja yz-tasoon projisoidut pisteet, joihin on sovitettu rungon pituusakselin (x-akselin) suuntainen sylinteri.



**Kuva 8.** Maalahopuurungon läpimitta-pituus -havaintojen suodatus ja tasoitus sekä puuttuvien läpimittojen interpolointi kuutiosplinfunktiolla tilavuuden määrittämistä varten.

### 2.3 Maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuuden arviointi

Maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuutta arvioitiin koeala- ja runkotasolla. Koealatason tarkastelussa maalahopuun määrää ja laatua koealalla kuvaavien tunnusten TLS-estimaatteja verrattiin maastomittauksiin perustuviin tunnuksiin. Maalahopuun kokonais-tilavuuden sekä rungon keskimääräisen järeyden, pituuden ja tilavuuden määrittämisen tarkkuutta arvioitiin virheen keskiarvon (harha) sekä keskineliövirheen neliöjuuren (RMSE, root mean square error) avulla:

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2}{n}} \quad (3)$$

joissa  $n$  on koealojen lukumäärä,  $\hat{X}_i$  koealan  $i$  maalahopuutunnuksen TLS-estimaatti ja  $X_i$  maastomittauksiin perustuva vastaava tunnus. Lisäksi koealatasolla arvioitiin yksittäisten maalahopuurunkojen tunnistamisen tarkkuutta. Tätä varten TLS-menetelmällä tunnistetuille maalahopuurungoille etsittiin niitä vastaavat maastossa mitatut rungot. Runkojen yhteensovittaminen perustui visuaaliseen tulkintaan, jossa käytettiin apuna koealan puukarttaa: pistepilvestä tunnistetun maalahopuurungon katsottiin vastaavan maastossa mitattua runkoa, jos niiden sijainti ja orientaatio koealalla vastasivat toisiaan. Jos pistepilvestä tunnistetulle rungolle ei löytynyt maastossa mitattua vastakappaletta, se tulkittiin virheelliseksi havainnoksi.

Runkojen yhteensovittamisen jälkeen voitiin arvioida maalahopuurunkojen tunnistus-tarkkuutta tunnistus- ja komissiovirheprosenttien avulla. Tunnistusprosentilla (kaava 4) kuvataan maastossa mitattuja maalahopuurunkoja vastaavien pistepilvestä tunnistettujen runkojen lukumäärän ( $N_{vast.}$ ) osuutta maalahopuurunkojen kokonaismäärästä ( $N_{maastom.}$ ). Komissiovirheprosentti (kaava 5) kuvaa virheellisten maalahopuuhavaintojen lukumäärän ( $N_{virh.}$ ) osuutta pistepilvestä tunnistettujen runkojen kokonaislukumäärästä ( $N_{TLS}$ ):

$$tunnistus - \% = \frac{N_{vast.}}{N_{maastom.}} \times 100 \quad (4)$$

$$komissiovirhe - \% = \frac{N_{virh.}}{N_{TLS}} \times 100 \quad (5)$$

Maalahopuurunkojen tunnistamisen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin vertaamalla pistepilvestä tunnistettujen runkojen ominaisuuksia tunnistamattomien runkojen ominaisuuksiin. T-testin avulla tutkittiin, poikkeavatko tunnistettujen runkojen dimensiot tunnistamattomien runkojen dimensioista tilastollisesti merkitsevästi. Kahden otoksen Kolmogorov–Smirnov -testin avulla tutkittiin, poikkeavatko tunnistettujen runkojen puulaji-, lahoaste- ja kuoren peittävyysjakaumat tilastollisesti merkitsevästi tunnistamattomien runkojen vastaavista jakaumista.

Runkotason tarkkuustarkastelussa verrattiin yksittäisten maalahopuurunkojen runkotunnusten TLS-estimaatteja maastossa mitattuihin tunnuksiin. Runkotunnusten eli maalahopuurungon järeyden, pituuden ja tilavuuden määrittämisen tarkkuutta arvioitiin virheen keskiarvon ja RMSE:n avulla kaavoilla 2 ja 3, joissa  $n$  oli nyt runkojen lukumäärä,  $\hat{X}_i$  rungon  $i$  runkotunnuksen TLS-estimaatti ja  $X_i$  maastomittauksiin perustuva vastaava tunnus. Tarkastelu rajattiin koskemaan vain runkoja, jotka tunnistettiin pistepilvestä sekä automaattiseen että visuaaliseen tulkintaan perustuvilla menetelmillä.

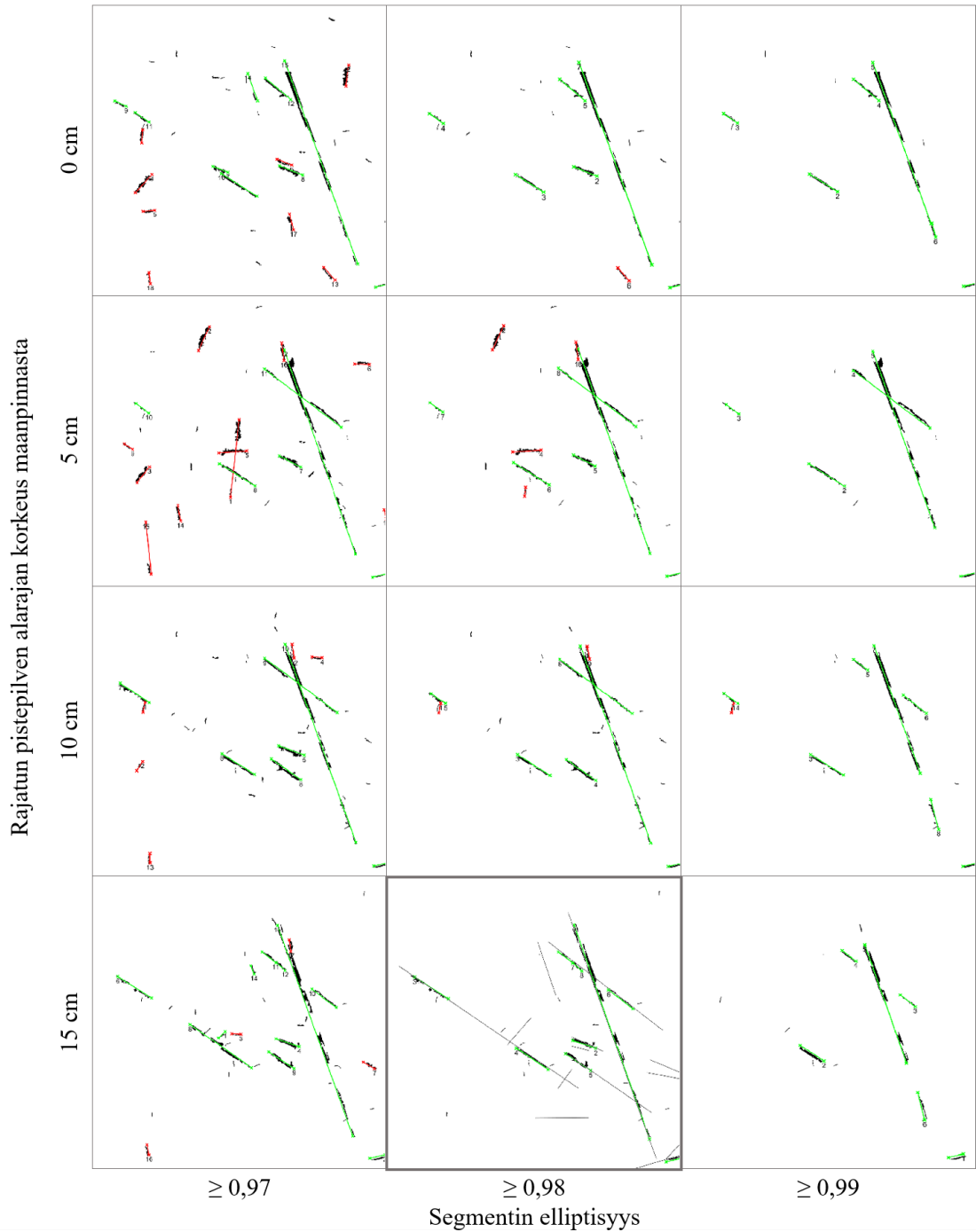
Maalahopuurunkojen kartoitusmenetelmän tarkkuustarkastelu tehtiin erikseen automaattiseen tunnistukseen perustuvalla menetelmällä ja manuaaliseen, pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä. Näin saatiin tietoa menetelmien välisten erojen lisäksi myös siitä, kuinka hyvin maalahopuut voidaan kartoittaa, jos käytettävissä on metsikkökoealalta maastolaserkeilaimella kerätty tiheä pistepilviaineisto.

## 3 TULOKSET

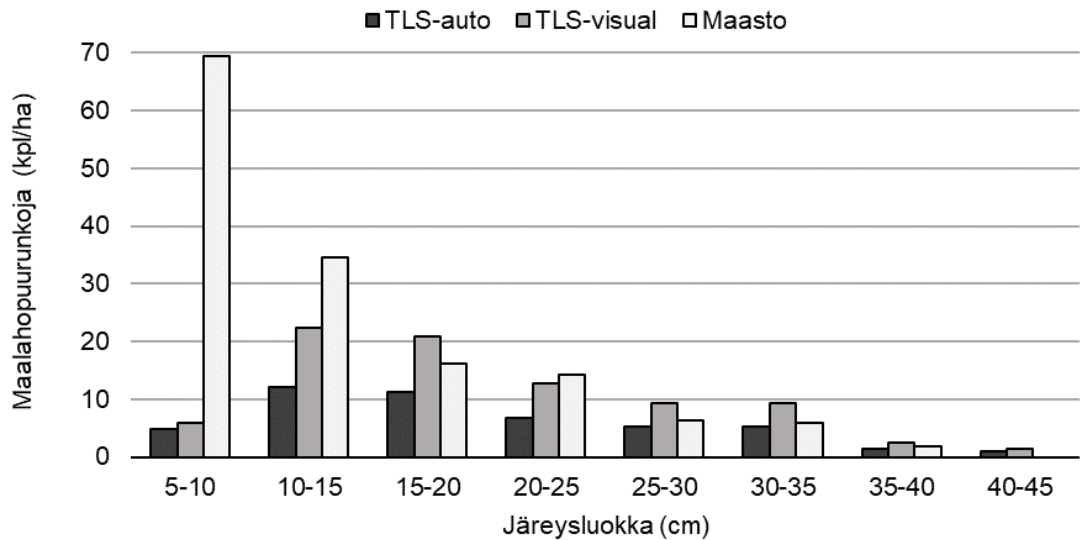
### 3.1 Maalahopuun kartoitusmenetelmän toimivuus

Maalahopuurunkojen automaattisessa tunnistamisessa kartoitusmenetelmän eri vaiheissa käytettyjen parametrien arvot vaikuttivat runkojen tunnistamiseen. Taulukossa 4 listatuista menetelmän parametreista keskeisimmin maalahopuiden automaattiseen tunnistamiseen vaikuttivat pistepilven korkeussuuntaisen rajauksen alarajan korkeus maanpinnasta sekä maalahopuurungoksi luokiteltavien pintamallisegmenttien vähimmäiseliptisyys. Näiden parametrien arvojen vaikutus maalahopuurunkojen tunnistukseen on esitetty kuvassa 9. Kun pistepilven korkeussuuntaisen rajauksen alarajaa sekä maalahopuurungoksi luokiteltavien pintamallisegmenttien vähimmäiseliptisyyttä nostettiin, pistepilvestä tunnistetut TLS-rungot vastasivat varmimmin maastossa mitattuja runkoja. Vastaa vasti pistepilven korkeussuuntaisen rajauksen alarajaa sekä pintamallisegmenttien vähimmäiseliptisyyden rajaa laskemalla voitiin tunnistaa enemmän maastossa mitattuja maalahopuurunkoja, mutta samalla myös virheellisten havaintojen määrä kasvoi (kuva 9).

TLS-pistepilvistä tunnistetuille maalahopuurungoille määritettyjen runkotunnusten perusteella voitiin muodostaa estimaatit maalahopuun määrälle ja laadulle koealatasolla sekä määrittää maalahopuun keskitilavuus ja järeysjakauma tutkimusalueella. Pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä maalahopuun keskitilavuusestimääksi saatiin 24,8 m<sup>3</sup>/ha, joka poikkesi vain hieman maastomittauksiin perustuvasta lukemasta 25,3 m<sup>3</sup>/ha. Pistepilvestä automaattisesti tunnistettujen runkojen perusteella maalahopuun keskitilavuuden estimaatti oli 12,4 m<sup>3</sup>/ha. Maastomittauksiin ja TLS-menetelmiin perustuvat maalahopuun järeysjakaumat tutkimusalueella on esitetty kuvassa 10. Jakaumien välisistä eroista havaitaan, että TLS-menetelmiin perustuvassa maalahopuukartoituksessa erityisesti järeydeltään 5–10 cm maalahopuun määrä tutkimusalueella aliarvioitiin. Maalahopuurunkojen automaattiseen tunnistamiseen perustuvalla kartoitusmenetelmällä aliarvio oli systemaattista järeysluokissa 5–40 cm. Visuaaliseen tunnistamiseen perustuva menetelmä tarkensi järeydeltään 10–25 cm maalahopuun määrän TLS-estimaattia, mutta yliarvioi järeämmän maalahopuun määrän (kuva 10).



**Kuva 9.** Metsikkökoelalta automaattisesti tunnistetut maalahopuurungot tunnistusprosessissa käytettyjen parametrien (ks. taulukko 4) arvojen erilaisilla yhdistelmillä. Mustat pintamallisegmentit kuvaavat pistepilvestä tunnistettuja maalahopuurunkoja tai niiden osia, vihreät janat pintamallisegmenttien perusteella tunnistettuja sekä maastossa mitattuja runkoja vastaavia TLS-runkoja ja punaiset janat virheellisiä havaintoja. Kuvassa alhaalla keskellä tässä tutkimuksessa käytetyn parametriyhdistelmän mukainen maalahopuurunkojen tunnistuskuva, jossa ohuet mustat janat kuvaavat maastossa mitattujen maalahopuurunkojen sijainteja. Kyseiseltä koelalta maastossa mitatuista 14 rungosta 6 runkoa (43 %) tunnistettiin automaattisesti ja 10 runkoa (71 %) pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä.



**Kuva 10.** Maalahopuun järeysjakauma tutkimusalueella, kun maalahopuun kartoitus perustui koelamittauksiin maastossa sekä runkojen automaattiseen (TLS-auto) ja visuaaliseen tunnistamiseen (TLS-visual) metsikkökoelajien TLS-pistepilvistä.

### 3.2 Maalahopuun koelatunnusten määrittämisen tarkkuus

Koelan TLS-pistepilven automaattiseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä yli 5 cm järeän maalahopuun kokonaistilavuuden määrittämisessä RMSE oli 15,0 m<sup>3</sup>/ha (taulukko 5). Automaattisella menetelmällä maalahopuun tilavuus metsikkökoelalla aliarvioitiin, ja aliarvio oli keskimäärin 11,7 m<sup>3</sup>/ha. Kun rungot tunnistettiin pistepilvestä visuaalisesti, RMSE oli 6,4 m<sup>3</sup>/ha tilavuusestimaatin ollessa lähes harhaton (taulukko 5).

Maalahopuun laatutunnusten määrittämisessä TLS-menetelmien väliset erot olivat pienemmät kuin kokonaistilavuuden määrittämisessä. RMSE oli runkojen keskijäreydelle 7,1 cm, keskipituudelle 4,4 m ja keskitilavuudelle 143,0 dm<sup>3</sup>, kun kartoitus perustui runkojen automaattiseen tunnistamiseen pistepilvestä (taulukko 5). Visuaaliseen tunnistamiseen perustuvalla menetelmällä varsinkin maalahopuurunkojen keskipituus määritettiin automaattista menetelmää tarkemmin, sillä vastaavat RMSE:t olivat 7,0 cm, 2,1 m ja 136,9 dm<sup>3</sup>. Molemmilla TLS-menetelmillä koelan maalahopuurunkojen keskimääräinen järeys sekä tilavuus yliarvioitiin, kun taas runkojen keskimääräinen pituus määritettiin keskimäärin mitattua pienemmäksi (taulukko 5).

**Taulukko 5.** Virheen keskiarvo ja RMSE maalahopuun määrää ja laatua koealatasolla kuvaavien tunnusten määrittämisessä maalahopuurunkojen automaattiseen (TLS-auto) ja visuaaliseen (TLS-visual) tunnistamiseen perustuvilla menetelmillä. Negatiivinen virhe kuvaa aliarviota ja positiivinen virhe yliarviota.

	virheen keskiarvo	RMSE
<b>TLS-auto</b>		
maalahopuun kokonaistilavuus (m <sup>3</sup> /ha)	-11,7	15,0
maalahopuurungon keskijäreys (cm)	4,6	7,1
maalahopuurungon keskipituus (m)	-2,2	4,4
maalahopuurungon keskitilavuus (dm <sup>3</sup> )	34,7	143,0
<b>TLS-visual</b>		
maalahopuun kokonaistilavuus (m <sup>3</sup> /ha)	0,4	6,4
maalahopuurungon keskijäreys (cm)	6,3	7,0
maalahopuurungon keskipituus (m)	-1,3	2,1
maalahopuurungon keskitilavuus (dm <sup>3</sup> )	104,7	136,9

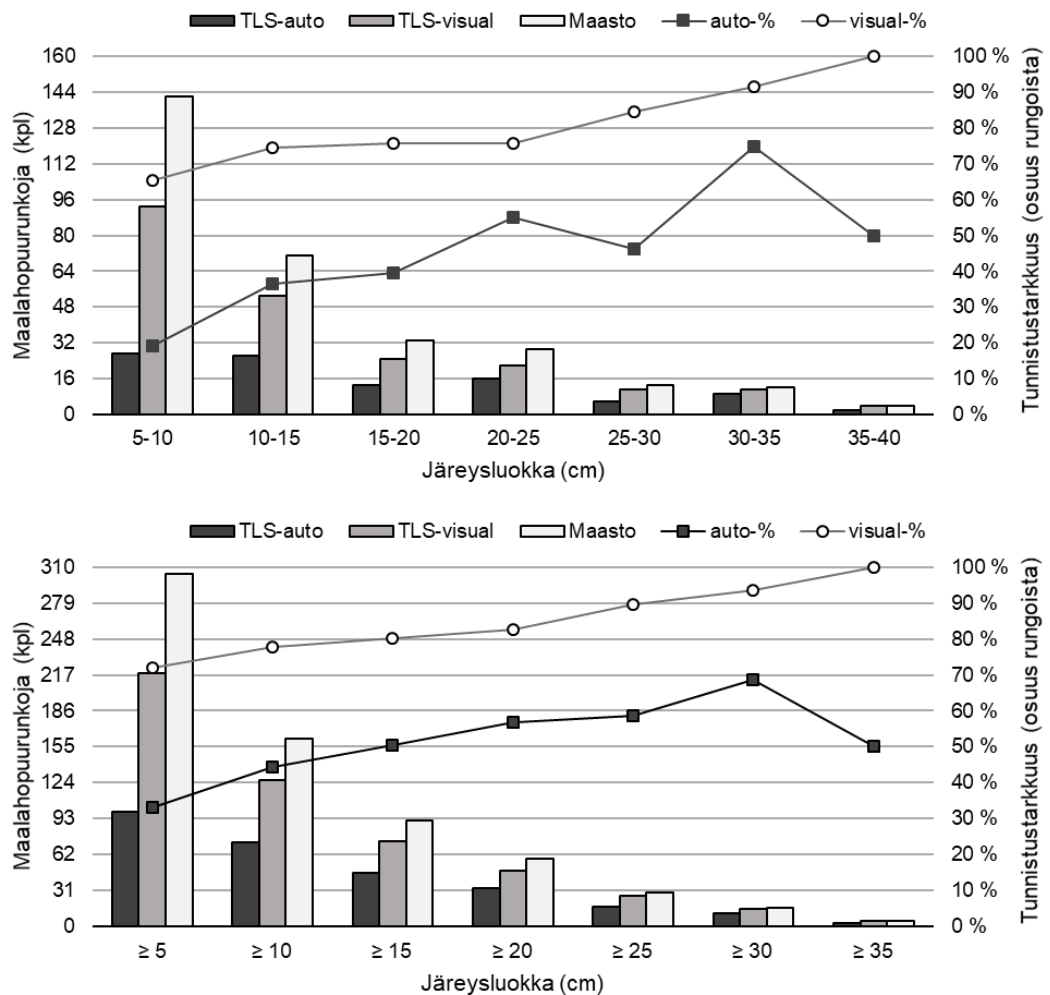
### 3.3 Maalahopuurunkojen tunnistamisen tarkkuus

Metsikkökoealoilta kerätyistä TLS-aineistoista tunnistettiin 72 % maastossa mitatuista vähintään 5 cm järeistä maalahopuurungoista, kun runkojen tunnistus perustui pistepilven visuaaliseen tulkintaan. Tunnistettujen runkojen yhteenlaskettu tilavuus oli 83 % maalahopuun kokonaistilavuudesta (taulukko 6). Maalahopuurunkojen automaattiseen tunnistamiseen perustuvalla menetelmällä tunnistettiin noin puolet pistepilvestä visuaalisesti tunnistetuista rungoista. Automaattisella menetelmällä tunnistettiin 33 % maalahopuurungoista, ja tunnistetut rungot edustivat 68 % maalahopuun kokonaistilavuudesta. Molemmilla menetelmillä noin neljäsosa kartoitetuista TLS-rungoista oli virheellisiä havaintoja (taulukko 6). Runkojen tunnistustarkkuus kuitenkin vaihteli metsikkökoealojen välillä. Parhaimmassa tapauksessa kaikki koealan maalahopuurungot tunnistettiin, kun tunnistus perustui pistepilven visuaaliseen tulkintaan. Automaattiseen tunnistukseen perustuvalla menetelmällä tunnistettiin parhaimmillaan 60 % rungoista ja 92 % tilavuudesta (taulukko 6).

**Taulukko 6.** TLS-menetelmillä tunnistetut osuudet maastossa mitattujen maalahopuurunkojen lukumäärästä sekä tilavuudesta. Komissiovirhe kuvaa virheellisiksi havainnoiksi luokiteltujen TLS-runkojen osuutta kaikista TLS-rungoista. Suluissa tunnuksen vaihteluväli metsikkökoealoilla.

	rungoista	tilavuudesta	komissiovirhe
TLS-auto	33 % (0–60 %)	68 % (0–92 %)	24 % (0–50 %)
TLS-visual	72 % (33–100 %)	83 % (11–100 %)	25 % (0–55 %)

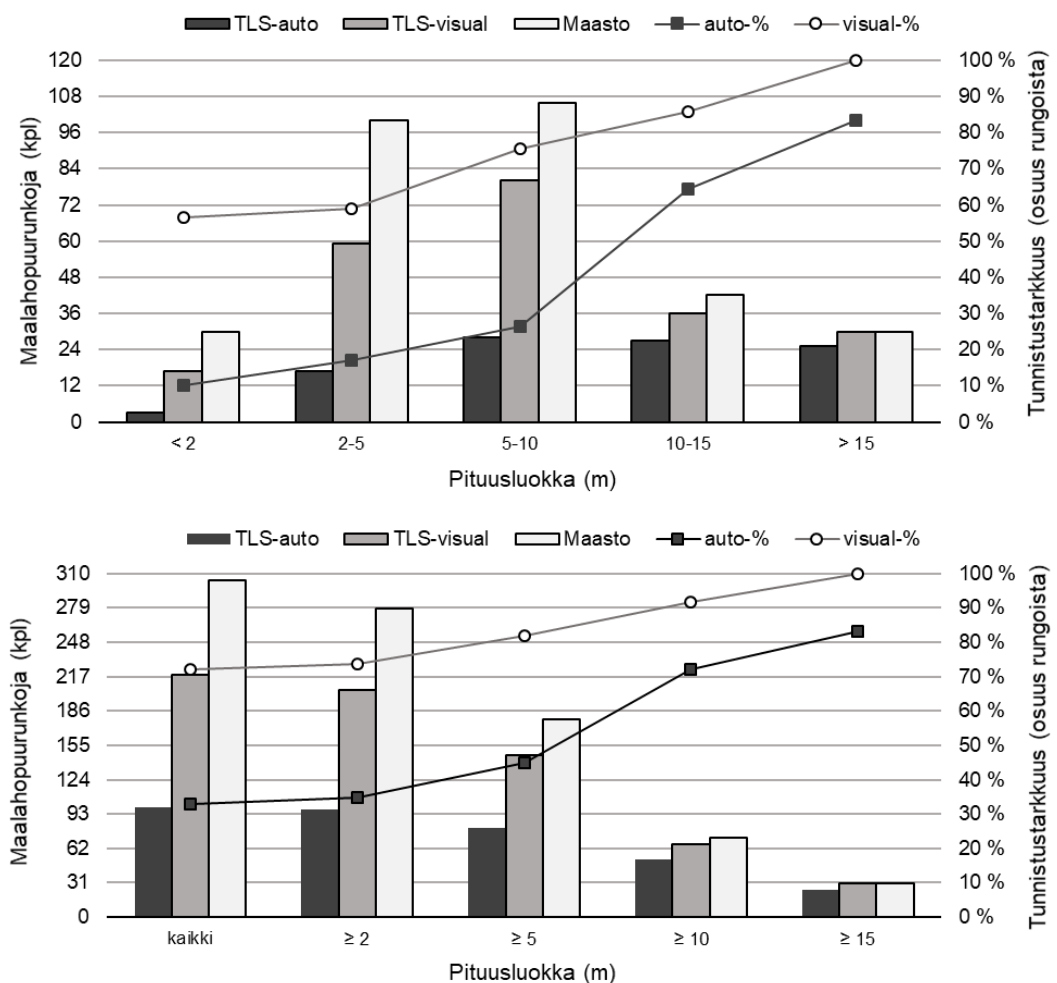
Maalahopuurunkojen tunnistamistarkkuuteen vaikutti tunnistettavan rungon koko: maalahopuurungot tunnistettiin sitä paremmin, mitä järempiä ne olivat. Järeydeltään 5–10 cm rungoista tunnistettiin visuaalisella menetelmällä 65 %, kun taas kaikkein järeimmistä rungoista tunnistettiin jo 100 %. Automaattisella tunnistusmenetelmällä vastaava järeysluokkien välinen tunnistustarkkuuden vaihtelu oli 19–75 % (kuva 11). Runkojen tunnistustarkkuus parani, kun kaikkein pienimmät rungot jätettiin huomiotta. Esimerkiksi järeydeltään vähintään 10 cm rungoista, jotka muodostivat 53 % runkojen lukumäärästä ja 93 % runkojen tilavuudesta (ks. taulukko 3), tunnistettiin pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä 78 % ja automaattiseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä 44 % (kuva 11).



**Kuva 11.** Maalahopuurunkojen tunnistamistarkkuus rungon järeiden suhteen. Pylväät kuvaavat maastossa mitattujen runkojen lukumäärän sekä TLS-pistepilven automaattiseen (TLS-auto) ja visuaaliseen (TLS-visual) tulkintaan perustuvilla menetelmillä tunnistettujen runkojen lukumäärän kussakin järeysluokassa. Viivakaavio kuvaa maastossa mitatuista rungoista TLS-menetelmillä tunnistettujen runkojen järeysluokittaiset osuudet.



Maalahopuurunkojen tunnistustarkkuuteen vaikutti järeyden lisäksi myös niiden pituus: runko tunnistettiin sitä paremmin, mitä pidempi se oli. Pistepilven visuaaliseen tulkintaan perustuvalla menetelmällä alle 2 m pituisista rungoista tunnistettiin 57 % ja yli 15 m pituisista rungoista 100 %, kun vastaava vaihteluväli oli automaattisella menetelmällä 10–83 % (kuva 12). Suhteellisesti eniten tunnistamattomia runkoja oli järeysjakauman tavoin myös pituusjakauman alkupäässä. Aineiston pisimpiä runkoja tarkasteltaessa esimerkiksi vähintään 5 m pituisista rungoista tunnistettiin visuaalisesti 82 % ja automaattisesti 45 %. Vastaavasti vähintään 10 m pituisista rungoista tunnistettiin visuaalisesti 92 % ja automaattisestikin jo 72 % (kuva 12).



**Kuva 12.** Maalahopuurunkojen tunnistamistarkkuus rungon pituuden suhteen. Pylväät kuvaavat maastossa mitattujen runkojen lukumäärän sekä TLS-pistepilven automaattiseen (TLS-auto) ja visuaaliseen (TLS-visual) tulkintaan perustuvilla menetelmillä tunnistettujen runkojen lukumäärän kussakin pituusluokassa. Viivakaavio kuvaa maastossa mitatuista rungoista TLS-menetelmillä tunnistettujen runkojen pituusluokittaiset osuudet.

Pistepilven automaattisessa tulkinnessa jäi tunnistamatta kaikkiaan 205 maalahopuurunkoa, mikä on 67 % kaikista maastossa mitatuista rungoista. Tunnistamattomista rungoista 85:tä eli 42 %:a ei tunnistettu myöskään visuaalisella menetelmällä. Merkittävimäksi tekijäksi runkojen tunnistamattomuuteen havaittiin niiden koko, sillä tunnistetut rungot olivat järeämpiä ja pidempiä kuin tunnistamattomat rungot (taulukko 7). Lisäksi automaattisesti tunnistetuttujen runkojen mediaanijäreys oli 2,9 cm suurempi ja mediaanipituus 3,6 m suurempi kuin visuaalisella menetelmällä tunnistetuilla rungoilla. T-testien perusteella erot olivat tilastollisesti merkitseviä ( $p < 0,05$ ). Muilla maalahopuurunkojen laatuominaisuuksilla kuten puulajilla, lahoasteella ja kuoren peittävyydellä ei havaittu olevan vaikutusta runkojen tunnistamiseen. Tunnistettujen ja tunnistamattomien runkojen puulaji-, lahoaste- ja kuoren peittävyysjakaumat eivät kahden otoksen Kolmogorov–Smirnov -testien perusteella poikenneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan ( $p > 0,05$ ).

**Taulukko 7.** TLS-pistepilven automaattiseen (TLS-auto) ja visuaaliseen (TLS-visual) tulkintaan perustuvilla menetelmillä tunnistettujen sekä tunnistamattomien maalahopuurunkojen lukumäärä sekä maastomittauksiin perustuvien järeys-, pituus- ja tilavuustunnusten vaihtelu. Kaikkien maalahopuurunkojen runkotunnusten vaihtelu on kuvattu taulukossa 3.

	tunnistetut			tunnistamattomat		
	läpimitta (cm)	pituus (m)	tilavuus (dm <sup>3</sup> )	läpimitta (cm)	pituus (m)	tilavuus (dm <sup>3</sup> )
<b>TLS-auto</b>	n = 99			n = 205		
<i>minimi</i>	5,3	1,2	3,4	5,0	0,9	3,5
<i>mediaani</i>	14,4	10,4	146,9	9,0	4,5	32,8
<i>maksimi</i>	39,5	28,0	2550,0	39,5	19,3	1056,6
<i>keskihajonta</i>	8,6	6,5	466,9	6,7	3,5	143,9
<b>TLS-visual</b>	n = 219			n = 85		
<i>minimi</i>	5,0	0,9	3,4	5,0	1,0	4,7
<i>mediaani</i>	11,5	6,8	70,8	8,5	3,7	24,2
<i>maksimi</i>	39,5	28,0	2550,0	33,4	13,8	354,7
<i>keskihajonta</i>	8,1	5,8	361,6	5,9	2,9	71,7

### 3.4 Maalahopuurunkojen laatutunnusten määrittämisen tarkkuus

Maastossa mitatuista 304 maalahopuurungosta 94 pystyttiin tunnistamaan koealan TLS-pistepilvestä sekä automaattiseen että visuaaliseen tulkintaan perustuvilla menetelmillä. Nämä rungot olivat järeämpiä ja pidempiä kuin koko aineistossa keskimäärin: mediaanijäreys oli 14,5 cm ja -pituus 10,6 m (vrt. taulukko 3). Runkojen järeiden määrittämisessä RMSE oli pistepilvestä automaattisesti tunnistetuille rungoille 5,7 cm ja visuaalisesti tunnistetuille rungoille 6,0 cm (taulukko 8). Järeys yliarvioitiin molemmilla menetelmillä, ja

yliarvio oli 3,2 cm automaattiselle ja 4,1 cm visuaaliselle tunnistusmenetelmälle. Visuaaliseen tunnistamiseen perustuvalla menetelmällä saatiin kuitenkin määritettyä automaattista menetelmää tarkemmin maalahopuurungon pituus ja siten myös tilavuus. Visuaalisella tunnistusmenetelmällä RMSE oli pituuden määrittämisessä 3,9 m ja tilavuuden määrittämisessä 201,7 dm<sup>3</sup>. Vastaavat lukemat automaattiselle TLS-menetelmälle olivat 7,2 m ja 305,7 dm<sup>3</sup>. Tilavuuden määrittämisessä visuaalinen menetelmä tuotti yliarvion ja automaattinen menetelmä aliarvion, kun taas pituus aliarvioitiin molemmilla menetelmillä (taulukko 8).

**Taulukko 8.** Virheen keskiarvo sekä RMSE maalahopuurunkojen järeyden, pituuden ja tilavuuden määrittämisessä sekä RMSE:n vaihtelu metsikkökoealoilla. Tarkastelussa rungot ( $n = 94$ ), jotka on tunnistettu pistepilvestä sekä automaattiseen (TLS-auto) että visuaaliseen (TLS-visual) tulkintaan perustuvilla menetelmillä. Negatiivinen virhe kuvaa aliarviota ja positiivinen virhe yliarviota.

	virheen keskiarvo	RMSE	RMSE:n vaihtelu koealoilla		
			minimi	mediaani	maksimi
<b>TLS-auto</b>					
<i>järeys (cm)</i>	3,2	5,7	0,4	5,2	9,4
<i>pituus (m)</i>	-5,5	7,2	0,1	6,7	14,1
<i>tilavuus (dm<sup>3</sup>)</i>	-100,8	305,7	21,1	187,6	949,8
<b>TLS-visual</b>					
<i>järeys (cm)</i>	4,1	6,0	1,6	4,7	12,3
<i>pituus (m)</i>	-2,6	3,9	0,7	3,4	9,2
<i>tilavuus (dm<sup>3</sup>)</i>	66,3	201,7	26,8	158,2	451,7

## 4 TULOSTEN TARKASTELU

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kehittää automaattinen menetelmä maalahopuun määrän ja laadun kartoitukseen metsikkökoevalta kerätystä TLS-pistepilvestä. Automaattisella kartoitusmenetelmällä pystyttiin kartoittamaan kaksi kolmasosaa järeydeltään vähintään 5 cm maalahopuuston tilavuudesta, ja kartoitusta voitiin edelleen tarkentaa pistepilven visuaalisella tulkinnalla. Metsikkökoevalaa kuvaavasta pistepilvestä tunnistetuille rungoille voitiin määrittää runkokohtaiset ominaisuus- ja sijaintitiedot, joiden avulla voitiin muodostaa kartta maalahopuun jakautumisesta koevalle. Runkojen ominaisuustietojen perusteella voitiin laskea estimaatit maalahopuun määrää ja laatua koevalatasolla kuvaaville tunnuksille sekä koostaa maalahopuun järeysjakauma koko tutkimusalueelle.

Maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuuteen vaikutti eniten maalahopuurunkojen automaattisen tunnistamisen onnistuminen koalan TLS-pistepilvestä. Runkojen automaattisesta tunnistamisesta johtuvaa epävarmuutta kartoitukseen tarkasteltiin vertaamalla automaattista tulkintaa visuaaliseen tulkintaan. Pistepilven visuaalisen tulkinnan voitiin olettaa kuvaavan tarkkuustasoa, joka maalahopuun automaattisessa kartoituksessa on mahdollista saavuttaa, kun käytettävissä on metsikkökoevalaa kuvaava tiheä pistepilvi. Jos maalahopuurunko tunnistetaan koalan pistepilvestä visuaalisesti, voidaan olettaa, että se on mahdollista tunnistaa pistepilvestä myös automaattisesti. Vastaavasti automaattisen tunnistusmenetelmän ei voida odottaa tunnistavan metsikkökoevalta maastossa mitattuja runkoja, joita ei pystytä tunnistamaan pistepilvestä edes visuaalisesti.

Merkittävimmäksi tekijäksi maalahopuurunkojen tunnistamiseen havaittiin niiden koko, sillä tunnistetut rungot olivat järeämpiä ja pidempiä kuin tunnistamattomat rungot (taulukko 7). Järeät ja pitkät rungot muodostavat maanpinnalta helpommin havaittavia säännöllisen muotoisia kohoumia, jotka voidaan tulkita maalahopuurungoiksi ja tunnistaa pistepilvestä joko visuaalisesti tai automaattisesti. Koko ei kuitenkaan yksinään selitä runkojen tunnistamista: taulukkoa 7 tarkasteltaessa havaitaan, että tunnistamatta on jäänyt myös järeitä ja pitkiä runkoja. Esimerkiksi visuaalisella menetelmällä tunnistamattomista rungoista suurin tilavuus  $354,7 \text{ dm}^3$  oli rungolla, jonka järeys oli 23,5 cm ja pituus 10 m. Tällainen selkeästi keskimääräistä suurempi runko on jäänyt havaitsematta, koska se ei ole näkynyt koalan pistepilvessä. Rungon dimensioiden lisäksi maalahopuurunkojen tunnistamiseen vaikuttaakin metsikkökoevalaa kuvaavan pistepilven laatu. Vaikka metsik-

kökoalat keilattiin viidestä pisteestä (ks. kuva 2), osa maalahopuurungoista jäi pistepilven katvealueille koealoilla, joilla puusto ja aluskasvillisuus oli runsasta. On syytä huomata, että tässä tutkimuksessa TLS-aineiston keruussa ei keilauspisteiden sijoittelussa suosittu erikseen maalahopuun kartoituksen kannalta optimaalisia sijainteja. Maalahopuun kartoitusta varten kerättävän TLS-aineiston keruussa tulisi kuitenkin huomioida pistepilven kattavuus varsinkin koealoilla, joille maalahopuusto on jakautunut epätasaisesti. Maalahopuurunkojen tunnistamisen ohella runkotunnusten eli järeyden, pituuden ja tilavuuden määrittämisessä oli kartoitusmenetelmän tarkkuuteen vaikuttavia virhelähteitä. Maalahopuurungon pituuden määrittäminen liittyy suoraan runkojen tunnistamiseen ja pistepilven laatuun, sillä rungon pituus määräytyi pistepilvestä tunnistetun rungonosan pituuden perusteella. Keskimäärin pituus aliarvioitiin, koska useimmiten runkoa ei pystytty tunnistamaan pistepilvestä koko pituudeltaan. Samasta syystä rungon järeyden eli läpimitan rungon puolivälissä yliarvioitiin: vaikka rungon läpimitat määritettäisiin virheettömästi, järeyden saattaminen mitata eri kohdasta runkoa kuin maastossa, jos runkoa ei pystytä tunnistamaan pistepilvestä koko pituudeltaan. Epävarmuutta läpimittojen määrittämiseen aiheuttaa lisäksi rungon epifyyttikasvusto. Läpimitta määritetään todellista suuremmaksi, jos runko on mittauskohdassa sammaleen peitossa. Rungon järeyden ja tilavuuden määrittämisessä käytettiin suodatettuja ja tasoitettuja läpimita-pituus -havaintoja, jolloin yksittäisten selkeästi virheellisesti määritettyjen läpimittojen vaikutus kartoitusmenetelmän tarkkuuteen voidaan olettaa olevan vähäinen (ks. kuva 8).

Maalahopuun kartoitusmenetelmän tarkkuuteen vaikuttaa edellisten lisäksi joukko automaattisen kartoitusmenetelmän eri vaiheissa käytettyjä oletuksia ja parametreja (taulukko 4). Kartoitusmenetelmä perustuu oletukseen, että maalahopuurungot erottuvat koealan pistepilvestä sylinterin muotoisina säännöllisinä kohoumina. Runkoa ei tunnisteta, jos sen kolmiulotteinen rakenne pistepilvestä poikkeaa tästä oletuksesta. Vastaavasti pienipiirteiset maanpinnan muodot voidaan virheellisesti tulkita maalahopuurungoiksi, jos niiden ulkomuoto muistuttaa maahan kaatunutta puuta. Maalahopuun kartoitusmenetelmässä keskeisimmän kartoituksen tarkkuuteen vaikuttivat parametrit, jotka kontrolloivat sylinterin muotoisten säännöllisten kohoumien luokittelua maalahopuurungoiksi (kuva 9). Parametrien optimointi ei ollut tämän tutkimuksen ensisijainen tavoite, sillä parametrien valintaan ja siten kartoitusmenetelmän toimivuuteen vaikuttaa myös metsikön rakenne. Kartoitusmenetelmä sekä siinä käytetyt parametrit olivat kaikille koealoille samat, mutta

kartoituksen tarkkuus vaihteli koealojen välillä (taulukot 6 ja 7), koska koealoja oli rakenteeltaan erilaisista metsiköistä (taulukot 1 ja 2). Maalahopuun kartoitukseen valitut metsikkökoealat poikkesivat tyypillisistä eteläsuomalaisista metsiköistä, sillä elävä pystyvuosto oli niissä keskimääräistä järeämpää ja maalahopuusto runsaampaa. Maastolaserkeilaukseen perustuvassa maalahopuun kartoituksessa voidaan odottaa päästävän tässä tutkimuksessa esitettyyn tarkkuustasoon metsiköissä, jotka ovat rakenteeltaan samankaltaisia kuin tutkimusaineistossa. Tällaisia ovat esimerkiksi varttuneet luonnontilaiset metsiköt, joissa järeää lahopuuta on runsaasti.

Maastolaserkeilaukseen perustuvassa maalahopuun kartoituksessa maahan kaatuneiden runkojen tunnistaminen poikkeaa pystyvuoston kartoituksesta. Pystyvuoston kartoituksessa rungot voidaan tunnistaa esimerkiksi metsikkökoealan pistepilvestä leikatuista muutamien senttimetrin paksuisista pistepilvikerroksista pyöreiden poikkileikkausalojen perusteella (Aschoff ja Spiecker 2004, Maas ym. 2008) tai pistepilven pisteiden lähiympäristön geometrian tulkintaan perustuvan pisteiden luokittelun avulla (Liang ym. 2012, Raunonen ym. 2015). Kuten maalahopuun myös pystyvuoston kartoituksessa puuston tiheys vaikuttaa merkittävästi runkojen tunnistamiseen, sillä pistepilven katvealueille jääneitä puita ei pystytä tunnistamaan (Kankare ym. 2015, Abegg ym. 2017). Metsikön rakenteesta riippuen pystyvuosta tunnistetaan noin 60–100 %, kun metsikkökoeala keilataan useasta pisteestä (esim. Maas ym. 2008, Liang ym. 2016). Maalahopuun kartoitusmenetelmän tavoin pystyvuoston kartoituksessa rungon läpimitan määrittäminen perustuu useimmiten ympyrän tai sylinterin sovittamiseen mittauskohdan runkopisteisiin (Maas ym. 2008, Liang ym. 2014b, Calders ym. 2015, Saarinen ym. 2017). Pystyvuoston rinnankorkeusläpimitan määrittämisessä RMSE vaihtelee tyypillisesti alle senttimetrinä muutamiin senttimetreihin (Liang ym. 2016, Kankare ym. 2017). Pystyvuoston kartoitukseen verrattuna maalahopuun kartoituksessa haasteita aiheuttaa sammaleen peittämien maalahopuurunkojen sijainti maanpinnalla aluskasvillisuuden seassa, jolloin rungon tunnistamisessa ja runkotunnusten määrittämisessä on pystyvuoston kartoitusta enemmän epävarmuutta.

Muihin lahopuun kaukokartoitusmenetelmiin verrattuna tässä tutkimuksessa kehitetyn maastolaserkeilaukseen perustuvan maalahopuun kartoitusmenetelmän etuna on tarkan runkotason tiedon tuottaminen. Lentolaserkeilaukseen ja yksittäisten runkojen tunnistamiseen perustuvilla kaukokartoitusmenetelmillä voidaan kartoittaa suurimpia yksittäisiä

kaatuneita puita (esim. Lindberg ym. 2013, Nyström ym. 2014). Maahan kaatuneiden runkojen tarkempi kartoitus sekä runkotunnusten määrittäminen vaatii seuranta-aineiston sekä tietoa metsikön historiasta (Tanhuanpää ym. 2015). Lahopuun kaukokartoitusmenetelmien vertailussa on kuitenkin huomioitava kartoituksen ja tiedonkeruun mittakaavatasot. Optisilla kaukokartoitusmenetelmillä sekä lentolaserkeilauksella voidaan kattaa kerralla laajoja alueita, kun taas maastolaserkeilaus soveltuu parhaiten puu- ja koealatasoin tulkintaan ja siten aputiedon tuottamiseen laajojen alueiden tulkintaa varten. TLS-aineiston kerääminen kokonaisista metsiköistä on työlästä, sillä esimerkiksi hehtaarin kartoittamiseen tarvitaan kymmeniä keilauspisteitä. Laajempien alueiden kartoittamiseksi laserkeilain voidaan kuitenkin asettaa kolmijalan sijaan liikkuvalla alustalla (MLS, Mobile Laser Scanning), jolloin metsikköä kuvaava pistepilvi voidaan tuottaa kustannustehokkaammin (Kukko ym. 2012, Liang ym. 2014c).

Maastolaserkeilaukseen perustuvalla maalahopuun kartoitusmenetelmällä voidaan tuottaa lisähyötyä lahopuun perinteiseen maastoinventointiin verrattuna. Pistepilvestä tunnistetulle maalahopuun kartoitukselle voidaan määrittää automaattisesti sijainti ja orientaatio koealalla, joiden tarkka määrittäminen maastossa on työlästä. Tuntemalla maalahopuun sijainnit saadaan muodostettua spatiaalisesti tarkempi kuvaus lahopuustosta. Koealan pistepilven perusteella voidaan tarvittaessa tuottaa tietoa myös elävän pystypuuston rakenteesta, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi saproksyyteille suotuisten elinympäristöjen kartoituksessa. Lahopuun kartoituksen laadun tunnusmerkkejä, jotka riippuvat rungon dimensioista, ei kuitenkaan pystytä määrittämään suoraan pistepilvestä. Esimerkiksi maalahopuun kartoituksen määrittäminen onnistuu luotettavasti vain maastossa tehtyjen havaintojen perusteella. Pistepilven visuaalisen tulkinnan avulla on kuitenkin mahdollista tehdä suoria havaintoja esimerkiksi puulajista ja rungon ulkoasusta. Visuaalisen tulkinnan avulla pistepilven pisteet voidaan värjätä keilauksen yhteydessä otetun digitaalikuuvan avulla, jolloin on mahdollista saada tietoa kohteen geometrisen rakenteen lisäksi sen spektrisisistä ominaisuuksista.

Tietoa lahopuun määrästä ja laadusta tarvitaan metsäluonnon monimuotoisuuden arvioimista varten. Laadultaan monipuolisen lahopuun määrä on yhteydessä luonnon monimuotoisuuteen, sillä lahopuusto ylläpitää luonnon monimuotoisuutta tarjoamalla elinympäristön monille uhanalaisille lajeille (Harmon ym. 1986, Franklin ym. 1987, Esseen ym. 1997, Siitonen 2001). Toistaiseksi ainoa tapa tuottaa tarkkaa tietoa lahopuun määrästä ja

laadusta on ollut maastoinventointi perinteisin mittausmenetelmin, vaikka muussa metsän kartoituksessa erilaiset kaukokartoitukseen perustuvat menetelmät ovat kuluneen vuosikymmenen aikana yleistyneet (Holopainen ym. 2014). Maastolaserkeilaus on osoittautunut tehokkaaksi tiedonkeruumenetelmäksi elävän puuston koalamittaukseen (esim. Maas ym. 2008, Calders ym. 2015, Liang ym. 2016), ja tässä tutkimuksessa esitettyjen tulosten perusteella se soveltuu myös maalahopuun kartoitukseen. Maalahopuun kartoitus metsikkökoalaa kuvaavasta tiheästä pistepilvestä on mahdollista automatisoida, mikä parantaa menetelmän sovellettavuutta käytännön sovelluksissa.



## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä tutkimuksessa kehitetty maastolaserkeilaukseen perustuva maalahopuun automaattinen kartoitusmenetelmä perustuu yksittäisten maalahopuurunkojen tunnistamiseen sekä tunnistettujen runkojen runkotunnusten määrittämiseen metsikkökoealan TLS-pistepilvestä. Tutkimuksen tulokset osoittavat maastolaserkeilauksen soveltuvan maalahopuun kartoitukseen metsikkökoealoilta, sillä suurin osa maastossa mitatusta maalahopuustosta voitiin kartoittaa maastolaserkeilaamalla tuotetun tiheän pistepilven avulla. Kartoitus on sitä luotettavampaa, mitä järeämmästä lahopuusta ollaan kiinnostuneita.

Maalahopuun kartoitusta varten kerättävän pistepilven tulee olla mahdollisimman kattava, jotta maalahopuun kartoitus onnistuu luotettavasti. Tiheä puusto ja aluskasvillisuus luovat pistepilveen katvealueita, joilta maalahopuurunkoja ei voida tunnistaa. Kattavan pistepilven tuottamiseksi koealalta tarvitaan useita keilauspisteitä, joiden sijoittelussa tulee huomioida maalahopuun jakautuminen koealalle. Maalahopuun kartoittamiseksi kokonaisista metsiköistä pistepilvi voidaan kerätä liikkuvalla alustalla kiinnitetyllä laserkeilaimella kustannustehokkuuden parantamiseksi.

Maastolaserkeilaukseen perustuva maalahopuun automaattinen kartoitusmenetelmä toimii parhaiten varttuneissa metsiköissä, joissa maalahopuusto on järeää ja pistepilven laatua heikentävää aluskasvillisuutta on vähän. Jos halutaan tietoa maalahopuun määrästä sekä runkojen dimensioihin perustuvista laatutunnuksista, maastolaserkeilaukseen perustuva kartoitusmenetelmä on varteenotettava vaihtoehto perinteisille lahopuun maastointimentimien menetelmille. Jos tarkoituksena on tuottaa tarkempaa tietoa maalahopuurunkojen laadullisista ominaisuuksista kuten lahoasteesta ja puulajista, tarvitaan lisäksi maastossa tehtyjä havaintoja.

## KIRJALLISUUS

Abegg, M., Kükenbrink, D., Zell, J., Schaepman, M.E. & Morsdorf, F. 2017. Terrestrial Laser Scanning for Forest Inventories –Tree Diameter Distribution and Scanner Location Impact on Occlusion. *Forests* 8(6): 184–213.

Abrahamsson, M. & Lindbladh, M. 2006. A comparison of saproxylic beetle occurrence between man-made high- and low-stumps of spruce (*Picea abies*). *Forest Ecology and Management* 226: 230–237.

Ahlroth, P., Lehesvirta, T. & Kostamo, J. 2004. Säästöpuut, lahopuu ja lehtipuu. Julkaisussa: Kuuluvainen, T., Wallenius, T. & Pennanen, J. 2004. Metsän luontainen rakenne, dynamiikka ja monimuotoisuus. Julkaisussa: Kuuluvainen, T., Saaristo, L., Keto-Tokoi, P., Kostamo, J., Kuuluvainen, J., Kuusinen, M., Ollikainen, M. & Salpakivi-Salomaa, P. (toim.). Metsän kätköissä – Suomen metsäluonnon monimuotoisuus. Edita Publishing Oy, Helsinki: 48–75.

Aschoff, T. & Spiecker, H., 2004. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36(8): 72–75.

Bater, C.W., Coops, N.C., Gergel, S.E., LeMay, V. & Collins, D. 2009. Estimation of standing dead tree class distributions in northwest coastal forests using lidar remote sensing. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 1080–1091.

Beyerer J., Puente León F & Frese C. 2016. Morphological Image Processing. Julkaisussa: Beyerer J., Puente León F & Frese C. (toim.). *Machine Vision*. Springer, Berlin, Heidelberg. s. 607–647.

Bolles R. C. & Fischler M. A. 1981. A ransac-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data. *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*: 637–643.

Bütler, R. & Schlaepfer, R. 2004. Spruce snag quantification by coupling colour infrared aerial photos and a GIS. *Forest Ecology and Management* 195: 325–339.

Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J. & Kaasalainen, M. 2015. Nondestructive estimates of above- ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution* 6(2): 198–208.

Canadell, J. G. & Raupach, M. R. 2008. Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320: 1456–1457.

Dixon, R. K., Solomon, A., Brown, S., Houghton, R., Trexler, M. & Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185–190.

Esseen, P.-A., Ehnström, B., Ericson, L. & Sjöberg, K. 1997. Boreal forests. *Ecological Bulletins* 46: 16–47.

Fischler, M.A. & Bolles, R.C. 1987. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Julkaisussa Foley, J.D. (toim.) Readings in computer vision: issues, problems, principles and paradigms.* Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, CA, USA. s. 726–740.

Franklin, J.F., Shugart, H.H. & Harmon, M.E. 1987. Tree death as an ecological process. *BioScience* 37: 550–556.

Grove, S.J. 2002. Saproxylic insect ecology and the sustainable management of forests. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33: 1-23.

Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Andersson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, K. Jr. & Cummins, K.W. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15: 133–302.

Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013a. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 5. 75 s.

Holopainen M., Kankare V., Vastaranta M., Liang X., Lin Y., Vaaja M., Yu X., Hyypä J., Hyypä H., Kaartinen H., Kukko A., Tanhuanpää T., Alho P. 2013b. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning - A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* 12: 546–553.

Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyypä, J. 2014. Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests* 2014(5): 1682–1694.

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

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

Jonsell, M. & Weslien, J. 2003. Felled or standing retained wood – it makes a difference for saproxylic beetles. *Forest Ecology and Management* 175: 425–435.

Kangas, A., Aakala, T., Alanen, H. Haavisto, M., Heikkilä, J., Kaila, A., Kankaanpää, S., Kämäri, H., Leino, O., Mäkinen, A., Nurmela, E., Oksa, S., Saari, A., Tikkanen, S-M. & Wathén, M. 2004. Lahopuuinventoinnin menetelmien vertailu Nuuksion ulkoilalueilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2004: 43–51.

Kankare, V. 2015. The prediction of single-tree biomass, logging recoveries and quality attributes with laser scanning techniques. *Dissertationes Forestales* 195. 49 s.

Kankare, V., Holopainen, M., vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. & Alho, P. 2013. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75: 64–75.

Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Liang, X., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A. & Hyypä, J. 2017. Outlook for the Single-Tree-Level Forest Inventory in Nordic

- Countries. Julkaisussa: Ivan, I., Singleton, A., Horák, J. & Inspektor, T. (toim). *The Rise of Big Spatial Data. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Springer, Cham. s. 183–195.
- Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2015. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 108: 161–171.
- Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J. & Chen, Y. 2012. Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors* 12(9): 11712–11733.
- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume function for pine, spruce and birch. *Publications of Forest Research Institute in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*, 108. 74 s.
- Leino, O., Holopainen, M., Mäkinen, A., Happonen, H., Kiviaho, T. & Tuominen, R. 2006. Pysty- ja maalahopuuston inventointi relaskooppiotannan avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006: 383–390.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M & Holopainen, M. 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(2): 661–670.
- Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyypä, J., Honkavaara, E., Liu, J. & Kaartinen, H. 2014a. The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. *Remote Sensing* 6(7): 6587–6603.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyypä, J. & Holopainen, M. 2014b. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52: 1739–1748.
- Liang, X., Hyypä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A. & Yu, X. 2014c. The use of a mobile laser scanning system for mapping large forest plots. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 11(9): 1504-1508.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggren, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guang, F., Holopainen, M. & Vastaranta, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: 63–77.
- Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. 1987. *Remote sensing and image interpretation*, 2nd edition. John Wiley and Sons, New York, NY, USA. 721s.
- Lindberg, E., Hollaus, M., Mücke, W., Fransson, J. E., & Pfeifer, N. 2013. Detection of lying tree stems from airborne laser scanning data using a line template matching algorithm. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 5: 169-174.
- Maas, H., Bienert, A., Schieller, S. & Keane, E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote*

Sensing 29(5): 1579–1593.

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.

Newnham, G.J., Armston, J.D., Calders, K., Disney, M.I., Lovell, J.L., Schaaf, C.B., Strahler, A.H. & Danson, F.M. 2015. Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement. *Current Forestry Reports* 1(4): 239–251.

Nittérus, K., Gunnarsson, B. & Axelsson, E. 2004. Insects reared from logging residues on clear-cuts. *Entomologica Fennica* 15: 53–61.

Nyström, M., Holmgren, J., Fransson, J.E.S. & Olsson, H. 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 30 (2014): 21–29.

Pasher, J. & King, D.J. 2009. Mapping dead wood distribution in a temperate hardwood forest using high resolution airborne imagery. *Forest Ecology and Management* 258: 1536–1548.

Pesonen, A., Maltamo, M., Eerikäinen, K., Packalèn, P. 2008. Airborne laser scanning-based prediction of coarse woody debris volumes in a conservation area. *Forest Ecology and Management* 255: 3288–3296.

Pesonen, A., Leino, O., Maltamo, M. & Kangas, A. 2009. The comparison of field sampling methods and the use of airborne laser scanning as auxiliary information for assessing coarse woody debris. *Forest Ecology and Management* 257: 1532–1541.

Pukkala, T. 2004. Dealing with ecological objectives in the MonSU planning system. *Silva Lusitana, Special issue* (2004): 1–15.

Rassi, P., Hyvärinen, E., Juslén, A. & Mannerkoski, I. (toim.) 2010: Suomen lajien uhanalaisuus – Punainen kirja 2010. Ympäristöministeriö & Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 685 s.

Raumonen, P., Kaasalainen, M., Åkerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., & Lewis, P. 2013. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing* 5(2): 491–520.

Raumonen, P., Casella, E., Calders, K., Murphy, S., Åkerblom, M. & Kaasalainen, M. 2015. Massive-scale tree modelling from TLS data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2(3): 189–196.

Saarinen, N., Kankare, V., Vastaranta, M., Luoma, V., Pyörälä, J., Tanhuanpää, T., Liang, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2017. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 123: 140–158.

Siitonen, J. 2001. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms:

- Fennoscandian boreal forests as an example. *Ecological Bulletins* 49: 11–41.
- Similä, M., Kouki, J. & Martikainen, P. 2003: Saproxylic beetles in managed and semi-natural Scots pine forests: quality of dead wood matters. *Forest Ecology and Management* 174: 365–381.
- Speight, M.C.D. 1989. Saproxylic invertebrates and their conservation. *Nature and Environment Series 42*. Council of Europe, Strasbourg. 81 s.
- Tanhuanpää, T., Kankare, V., Vastaranta, M., Saarinen, N. & Holopainen, M. 2015. Monitoring downed coarse woody debris through appearance of canopy gaps in urban boreal forests with bitemporal ALS data. *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (4): 835–843.
- Tikkanen, O.-P., Martikainen, P., Hyvärinen, E., Junninen, K. & Kouki, J. 2006: Red-listed boreal forest species of Finland: associations with forest structure, tree species, and decaying wood. *Annales Zoologici Fennici* 43: 373–383
- Tomppo, E. & Halme, M. 2004. Using coarse scale forest variables as ancillary information and weighting of variables in k-nn estimation: a genetic algorithm approach. *Remote Sensing of Environment* 92: 1–20.
- Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O. & Katila, M. 2008. Combining National Forest Inventory Field Plots and Remote Sensing Data for Forest Databases. *Remote Sensing of Environment* 112: 1982–1999.
- Tomppo, E., Katila, M., Mäkisara, K. & Peräsaari, J. 2014. The Multi-source National Forest Inventory of Finland — methods and results 2011. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 319. 224 s.
- Valtakunnan metsien inventointi (VMI). 2015. [Verkkodokumentti]. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/info.htm>. [Viitattu 16.3.2018].
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11) maastotyön ohjeet 2009 Koko Suomi, 2. painos. Metsäntutkimuslaitos. 122 s.
- 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): 1–13.
- White, J.C., Wulder, M.A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N.C., Cook, B., Pitt, D. & Woods, M. 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. Information report FI-X-010. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, Pacific Forestry Centre, Victoria, BC. 50 s
- Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J.G., Bartholomeus, H., Brede, B. & Herold, M., 2017. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. *Remote Sensing of Environment* 196: 140–153.

Yu, X., Hyypä, J., Karjalainen, M., Nurminen, K., Karila, K., Vastaranta, M., Kankare, V., Kaartinen, H., Holopainen, M., Honkavaara, E., Kukko, A., Jaakkola, A., Liang, X., Wang, Y., Hyypä, H. & Katoh, M. 2015. Comparison of Laser and Stereo Optical, SAR and InSAR Point Clouds from Air- and Space-Borne Sources in the Retrieval of Forest Inventory Attributes. *Remote Sensing* 2015(7): 15933–15954.