

Pulssi- ja vaihe-erokeilaimen vertailu puustomittauksissa

Diplomityö
Rakennetun ympäristön laitos
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Aalto-yliopisto

Espoossa 27. maaliskuuta 2017

Tekniikan kandidaatti Aimad el Issaoui

Valvoja: Professori Henrik Haggrén
Ohjaajat: TkT Xinlian Liang
TkT Petri Rönnholm

Tekijä	Aimad el Issaoui	
Työn nimi	Pulssi- ja vaihe-erokeilaimen vertailu puustomittauksissa	
Koulutusohjelma	Geomatiikka	
Pääaine	Fotogrammetria ja kaukokartoitus	Koodi M3006
Työn valvoja	Professori Henrik Haggrén	
Työn ohjaaja(t)	TkT Xinlian Liang ja TkT Petri Rönholm	
Päivämäärä	Sivumäärä 60	Kieli Suomi

Tiivistelmä

Maalaserkeilauksen (Terrestrial Laser Scanning, TLS) on viime aikoina osoitettu soveltuvan hyvin puustoparametrien ratkaisemiseen. TLS on tarjonnut useassa tutkimuksessa lupaavia tuloksia esimerkiksi runkojen havaitsemisessa, rinnankorkeuden läpimitan (Diameter at Breast Height, DBH) mittaamisessa, rungon laadun ja muutoksen mittaamisessa sekä puunkorkeuden, puutilavuuden ja biomassan arvioinnissa. Vaikka TLS:n soveltuvuus metsämittauksissa on lupaava, on sen suurena ongelmana latvusten läpäisemättömyys. Monet edellä mainituista tutkimuksista on tehty vaihe-erokeilaimella. Osa on tehty pulssikeilaimella, mutta pulssikeilaimen ja vaihe-erokeilaimen välisiä eroja puustomittauksissa ei tiettävästi ole tutkittu. Jotta TLS-laitteistoa voidaan jatkossa hyödyntää laajemmin metsämittauksissa, tulee tietää, kumpi mittaustekniikka siihen parhaiten soveltuu.

Tässä työssä verrattiin kahden keilausmenetelmän, pulssimittauksen (Time of Flight, ToF) ja vaihe-eromittauksen (Phase Shift, PS), eroja puustomittauksissa keilaamalla ja pistepilvistä mittaamalla kuudella koealalla. Tutkimuksessa suoritettiin puustomittaukset keilainkohtaisesti jokaiselle koealalle niin yksittäisen (Single-Scan, SS) kuin useamman (Multi-Scan, MS) keilauksen tapauksessa. Puustomittaukset tehtiin sekä manuaalisesti että automaattisesti. Manuaalimittauksissa mitattiin aineistosta havaittujen puunrunkojen lukumäärä, kokonaisten puiden lukumäärä sekä havaitun puun rungon ylin mitattavissa oleva läpimitta. Automaattimittaukset suoritettiin tähän tarkoitukseen kehitetyllä algoritmilla. Algoritmi etsi aineistosta kaikki mitattavissa olleet puunrungot, rakens näkyvänä olleiden puunrunkojen perusteella runkokäyriä ja estimoi puiden korkeudet runkoikäyrän perusteella.

Tulosten mukaan pulssikeilaimen läpäisykyky on parempi kuin vaihe-erokeilaimen läpäisykyky, kun on kyse puustomittauksista. Jokainen läpäisykykyä indikoiva tulos oli pulssikeilaimella parempi niin SS- kuin MS-mittauksissa. Läpäisykyvyn erot olivat tulosten mukaan kuitenkin merkittävästi suuremmat SS-mittauksissa. Kun verrattiin pulssikeilaimella saatuja tuloksia vaihe-erokeilaimiin SS-tapauksessa, paranivat tulokset keskimäärin seuraavanlaisesti: kokonaisia puita saatiin 52 % enemmän näkyviin, puun runkoja saatiin 10 % enemmän näkyviin ja puunrunkojen läpimitat saatiin mitattua 13 % korkeammalta. Vastaavat luvut MS-tapauksessa olivat 37, 4 ja 10 %. Algoritmin avulla saatiin SS-tapauksessa rungon läpimitta mitattua pulssikeilaimella keskimäärin 6 % korkeammalta. Puita havaittiin samassa mittausasetelmassa keskimäärin noin 16 % enemmän pulssikeilaimen hyväksi. Vastaavat luvut MS-tapauksessa olivat noin 3 ja 7 %.

Avainsanat Laserkeilaus, vaihe-eromittaus, vaihe-erokeilain, pulssimittaus, pulssikeilain, fotogrammetria, puustomittaukset

Author Aimad el Issaoui

Title of thesis Difference between Time-of-Flight and Phase-Shift laser scanners in tree measurements

Degree programme Degree Programme in Geomatics

Major Photogrammetry and Remote Sensing**Code** M3006

Thesis supervisor Professor Henrik Haggrén

Thesis advisor(s) D.Sc. (Tech.) Xinlian Liang and D.Sc. (Tech.) Petri Rönholm

Date 27.03.2017**Number of pages** 60**Language** Finnish

Abstract

Terrestrial laser scanning (TLS) has been proved to be a promising technique in tree measurements. In many studies TLS has been proved to provide some promising results in evaluating tree attributes such as number of stems, stem density, diameter at breast height (DBH), tree height, stem curves, stem volume, biomass, stem quality and change of stems. However, TLS measurements face the problem with the bad penetration through branches and leaves. Many previously mentioned studies have been done by using phase-shift (PS) laser scanners (LS). No studies about the difference between PS-scanners and time-of-flight (ToF) scanners in forest inventory could be found. In order to use TLS widely in forest measurements, the differences between TLS techniques have to be known.

In this study, the differences between PS-technique and ToF-technique have been compared by scanning and analysing 6 test plots. Tree attributes were measured from each laser scanner in Single-Scan (SS) and Multi-Scan (MS) mode. The LS data was analysed manually and automatically. In the manual measurements the number of complete trees, number of stems and the height of the highest measurable point of the stem were measured. In automatic measurements the algorithm locates each stem, creates a stem curve and estimates a height for a tree.

The results indicate a better penetration for the ToF-scanner when it is compared to the PS-scanner when it comes to tree measurements. In both measuring modes (SS and MS), each result indicated a better penetration for the ToF-scanner. The biggest difference between ToF and PS was in the SS-mode. The following percentages show how much the ToF results differed from the PS results in the SS-mode: 52 % in finding complete trees, 10 % in finding stems and 13 % in measuring the highest point of the measurable diameter. The corresponding results in the MS-mode were 37 %, 4 % and 10 %. In the automatic measurements, the highest point of the measurable diameter was 6 % better in ToF-data in the SS-mode. In the same mode algorithm found from ToF-data 16 % more stems compared to PS-data. Corresponding results for MS-mode were 3 and 7 %.

Keywords Laser scanning, laser scanner, phase shift, time of flight, photogrammetry, forest measurements

Alkusanat

Tämä diplomityö on toteutettu osana Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksen projektia. Haluan ensimmäisenä kiittää työnantajaani professori Juha Hyyppää sekä lähiesimiestäni professori Harri Kaartista, joiden ansiosta sain työskennellä tämän tutkimuksen parissa Paikkatietokeskuksessa. Haluan myös kiittää Suomen Akatemian strategisen tutkimuksen neuvostoa, jonka rahoittama projekti 'Osaamispohjainen kasvu 3D-digitalisaation, robotiikan, paikkatiedon ja kuvankäsittelyn sekä -laskennan yhdistetyssä teknologiamurroksessa, rahoituspäätös n:o 293389' on tukenut taloudellisesti tätä työtä.

Erityisesti haluan kiittää työni valvojaa professori Henrik Haggrénia sekä työni ohjaajia TkT Xinlian Liangia ja TkT Petri Rönholmia, jotka ovat antaneet työni kannalta arvokasta palautetta ja neuvontaa. Haluan myös kiittää TkT Xinlian Liangia siitä, että hän mahdollisti tutkimusaineiston automaattisen mittauksen hänen kehittämällään algoritmillaan. Erityiskiitoksen ansaitsee professori Harri Kaartinen, joka antoi työni kannalta todella arvokasta palautetta ja ohjausta. Kiitän myös Paikkatietokeskuksen muita työntekijöitä heidän luomastaan viihtyisästä ja lämminhenkisestä työympäristöstä.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani ja sisaruksiani, jotka ovat jatkuvasti tukeneet ja kannustaneet minua opintopolullani. Haluan myös kiittää ystäviäni ja muita läheisiäni, jotka ovat olleet viime vuosina tukemassa opintojani. Heistä haluan erityisesti kiittää Marieta ja Karlaa, jotka ovat kannustaneet ja olleet suurena tukena läpi opintojeni.

Espoo 27.3.2017

Aimad el Issaoui

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Lyhenteet

1	Johdanto.....	1
1.1	Aiheen esittely.....	1
1.2	Työn tausta ja tavoitteet	3
1.3	Työn rakenne.....	4
2	Laserkeilaimet.....	5
2.1	Lasersensorin toimintaperiaatteet.....	5
2.1.1	Vaihe-erokeilaimet (Phase-Shift, PS).....	6
2.1.2	Pulssikeilaimet (Time-of-Flight, ToF).....	7
2.2	Laserkeilainten mittausalustat.....	9
2.2.1	Ilmalaserkeilain.....	9
2.2.2	Liikkuva laserkeilain (MLS).....	11
2.2.3	Maalaserkeilain (TLS).....	12
2.3	Laserkeilainten sovellukset.....	14
3	Laserkeilainten käyttö puustomittauksissa	16
3.1	Rungon havaitseminen ja runkotiheys	16
3.2	Rinnankorkeuden läpimitan (DBH) mittaaminen	17
3.3	Puun korkeuden arviointi	19
3.4	Puutilavuuden ja biomassan arviointi	20
3.5	Rungon laadun ja muutoksen mittaaminen	21
4	Pulssi- ja vaihe-erokeilaimien vertailu puustomittauksissa Evon koealoilla.....	23
4.1	Aineiston keruu	23
4.1.1	Maastokoealat	24
4.1.2	Mittausvälineet.....	25
4.1.3	Mittausasetelma	27
4.2	Aineiston esikäsittely	28
4.3	Puustomittaukset	30
4.3.1	Manuaalimittaukset.....	30
4.3.2	Automaatiomittaukset.....	32
5	Tutkimustulokset	35
5.1	Manuaalimittaukset.....	35
5.1.1	Single-Scan –mittausten erot	35
5.1.2	Multi-Scan –mittausten erot.....	39
5.2	Automaattiset mittaukset.....	41
5.2.1	Single-Scan –mittausten erot	42
5.2.2	Multi-Scan –mittausten erot.....	43
6	Pohdinta	46
7	Yhteenvedo	52

Lyhenteet

3D	Three-Dimensional – Kolmiulotteinen
ALS	Airborne Laser Scanning/Scanner – Ilmalaserkeilaus/-keilain
DBH	Diameter at Breast Height – Rinnankorkeuden läpimitta
GPS	Global Positioning System – Amerikkalainen satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System – Globaali paikannusjärjestelmä
GLONASS	Globalnaja Navigatsionnaja Sputnikovaja Sistema – Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä
H	Height – Korkeus
IMU	Inertial Measurement Unit – Inertiaalijärjestelmä
LS	Laser Scanning/Scanner – Laserkeilaus/-keilain
MLS	Mobile Laser Scanner/Scanning – Maalaserkeilaus/-keilain
MS	Multi-scan – Useammasta keilauksesta koostuva kokonaisuus
PLS	Personal Laser Scanning/Scanner – Henkilökohtainen laserkeilain/-keilaus
PS	Phase-Shift – Vaihe-eromittaus
SS	Single-Scan – Yksittäinen keilaus
TLS	Terrestrial Laser Scanning/Scanner – Maalaserkeilaus/-keilain
ToF	Time-of-Flight – Valon kulku aikaan perustuva pulssimittaus

1 Johdanto

Tässä luvussa esitetään diplomityön rakenne kokonaisuudessaan. Kappaleessa 1.1 käydään läpi työn aihetta ja sen taustoja. Luvussa tutustutaan metsämittauksen toteuttamistapoihin ja niihin liittyviin ongelmiin. Lisäksi luvussa kuvaillaan laserkeilaimen toimintaperiaatetta lyhyesti. Luvussa 1.2 käydään läpi työn taustoja ja sen motiiveja. Luvussa esitetään myös tämän tutkimuksen hypoteesi ja tavoitteet. Viimeisessä luvussa 1.3 esitetään työn rakennetta.

1.1 Aiheen esittely

Metsät ovat aina olleet ja tulevat pitkään olemaan yksi Suomen tärkeimmistä luonnonvaroista. Yksi syy tähän on metsien pinta-ala suhteessa koko Suomen maa-alaan. Yhdistyneiden kansakuntien alaisuudessa toimiva elintarvike- ja maatalousjärjestö on julkaisussaan (FAO, 2015) arvioinut, että vuonna 2015 Suomen maa-alasta noin 73,1 % oli metsien peitossa. Koska teollisuudessa puutavaraa käytetään monipuolisesti ja ekologisuus korostuu nykypäivänä entistä enemmän, on metsämittauksille syntynyt uusia vaatimuksia. On välttämätöntä saada entistä yksityiskohtaisempaa ja tarkempaa tietoa niin yksittäisistä puista kuin kokonaisista metsistä, jotta voidaan tehdä riittävän tarkkoja metsänhoitosuunnitelmia. (Vastaranta ym., 2009)

Puustomittausten sekä metsäinventoinnin kannalta kriittiset tiedot, kuten rinnankorkeuden läpimitta (Diameter at Breast Height, DBH), puun korkeus (Height, H), puulaji ja tilavuus, ovat välttämättömiä, kun arvioidaan muun muassa metsäpalovaaraa, metsien biomassaa, ekosysteemiä tai hiilen sitoutumista. Metsäinventointitiedoilla on suuri rooli jatkotutkimusten kannalta. Tarkkaan ja huolella mitattu aineisto voidaan käyttää tehokkaasti taloudellisten muuttujien ratkaisemisessa, joilla saadaan laskettua esimerkiksi puutuotteiden tuottoa tai metsien kokonaisarvoa. Tämän lisäksi tietoja voidaan hyödyntää tutkittaessa metsien ekologisuutta, metsien vakautta, ekosysteemiä sekä luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä. Tällöin voidaan saada parempi käsitys metsäekosysteemin roolista ilmastomuutoksessa, kuten hiilen ja veden kierron suhteen. (Moskal ja Zheng, 2011).

Perinteisesti metsäsuunnittelun maastomittaukset on toteutettu kuvioittaisena arviointina. Tässä ongelmana on se, että suurin osa kuvioittaisista arvioinneista toteutetaan edelleen silmävaraisesti, joten lopputulokseen vaikuttaa hyvinkin paljon mittajaan ammattitaito. Vuonna 2009 esitettiin visio, jossa metsämittauksiin otettaisiin laserkeilaimet mukaan. Näin metsäsuunnittelun käyttöön syntyisi huomattavasti tarkempia ja ennen kaikkea objektiivisiä tuloksia (Vastaranta ym., 2009). Viisi vuotta myöhemmin tilannetta tarkasteltiin uudestaan, jolloin todettiin vision toteutuneen ja samalla tuottaneen huomattavia säästökustannuksia. Mittauksiin otettiin mukaan erityisesti ilma- ja maalaserkeilaimet. (Holopainen ym., 2014).

Laserkeilaus (Laser scanning, LS) on jatkuvasti yleistynyt kartoitusmenetelmä, jota käytetään topografian, kasvillisuuden, jäätikköalueiden, rakennetun ympäristön, infrastruktuurin sekä muiden kiinnostuksen kohteiden kartoittamiseksi. (Kukko, 2013). LS on melko uusi tekniikka, vaikka sitä alettiin käyttää ensimmäisiä kertoja jo 70-luvulla. Tuolloin NASA kehitti ensimmäisen mittausmenetelmän, joka perustui lentokoneesta tehtävään lasermittaukseen. (Holopainen ym., 2013). Kuitenkin laserkeilaimilla (Laser Scanner, LS) kesti yli 30 vuotta ennen kuin keilaimista saatiin riittävän käytännöllisiä ja kustannustehokkaita laajempaa käyttöä varten. Yksi tärkeimpiä syitä laserkeilainten hitaaseen yleistymiseen on ollut tekni-

kan puute, jolloin käytännöllisiä keilaimia ei voitu kehittää. Vasta viimeisen 20 vuoden aikana tapahtuneen prosessoritehon ja algoritmien kehitysten myötä on voitu LS-tekniikkaa hyödyntää laajemmin. Tämä kehitys on mahdollistanut tiheiden pistepilvien prosessoinnin kustannustehokkaasti, jonka myötä on avautunut monia mahdollisuuksia hyödyntää LS-tekniikkaa eri tieteen- ja teollisuudenaloilla. (Blais, 2004).

LS:lla saadaan tuotettua nopeasti ja luotettavasti jopa alle millimetrin tarkkaa kolmiulotteista informaatiota ympäristöstä. Toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Laserkeilaimen perustoimintaperiaate perustuu lähetetyn laserpulssin suunnan sekä vastaanotetun pulssin mittaamiseen. Näillä tiedoilla kohteen etäisyys ja sijainti suhteessa keilaimeen saadaan laskettua tarkasti. (Wehr ja Lohr, 1999).

Metsävarojen hoitoon liittyvä päätöksenteko perustuu pääosin inventoinnin aikana kerättyyn informaatioon. Metsäinventoinnissa käytettävä aineistoa voidaan kuitenkin kerätä hyvin monella eri tavalla hyödyntäen monenlaista tekniikkaa riippuen inventoinnin päämäärästä, skaalasta, resurssista sekä tarvittavasta tarkkuudesta. Monet inventointimenetelmät perustuvat kenttätyössä kerättyyn aineistoon, jolloin metsäinventoinnin tarkkuus on riippuvainen kerätyn aineiston laadusta ja määrästä. (Liang ym., 2016). Metsämittauksissa käytetään pääsääntöisesti kahta keilausmenetelmää: ilmalaserkeilausta (ALS, Airborne Laser Scanning) ja maalaserkeilausta (TLS, Terrestrial Laser Scanning). Ilmalaserkeilain on jo vakiinnuttanut asemansa metsämittauksissa, kun taas maalaserkeilain on vasta tuloillaan. Toimintaperiaatteet ovat molemmissa samat. Ero on siinä, että toista käytetään ilmasta lentokoneen tai lennokin kyydittämänä, kun taas toisella suoritetaan maasta käsin staattisia mittauksia. (Maltamo ym., 2008; Holopainen ym., 2014)

ALS-keilaimella pystytään tehokkaasti mittaamaan suuriakin metsäaloja. Lasersäteet saavat mitattua puiden latvojen lisäksi jonkin verran maanpintaa, jolloin saadaan vähintään puiden korkeudet mitattua melko hyvin. ALS:n huonona puolena on aluspuiden jääminen isompien puiden alle piiloon, jolloin merkittävä osa puista saattaa jäädä kokonaan havaitsematta. Toinen huono puoli on se, ettei mitattavien puiden tilavuutta pystytä kovin hyvin määrittämään, koska yksittäisen puun pistetiheys ei ole riittävä. Pulssitiheydet vaihtelevat tiheäpulsseissa keilauksessa 5-30 pulssia/m² ja harvapulsseissa keilauksessa 0,5-2 pulssia/m². Vaikka pulssitiheys saataisiinkin korkeammaksi, on puiden runkojen mittaaminen ylhäältä päin hankalaa niin huonon mittauskulman kuin latvuksen tiheyden takia. (Maltamo ym., 2008; Holopainen ym., 2014)

TLS-mittauksilla saadaan korvattua ALS-mittausten puutteet. Mittaus tapahtuu maanpinnalta, jolloin keilain asetetaan paikalleen ja se skannaa koko ympäristön. Keilaus voidaan toistaa useammasta kohtaa, jotta runkojen ja muiden esteiden taakse jäävät puut saataisiin myös mitattua. Useat keilaukset voidaan jälkikäteen yhdistää yhdeksi isommaksi pistepilveksi. Tällä menetelmällä saadaan hyvinkin tarkkaan laskettua muun muassa rungon läpimitan usealta eri korkeudelta eli runkokäyrä. Runkokäyrästä saadaan laskettua rinnankorkeuden läpimitta DBH sekä joissain tapauksissa puun korkeus. Vaikka TLS-menetelmällä saadaan hyvinkin tarkkoja tuloksia, on se huomattavasti hitaampaa kuin ALS. Koko ympäröivän tilan TLS-mittaus noin 100 metrin etäisyyteen asti kestää vain 2-4 minuuttia, mutta itse maastossa liikkuminen vie huomattavasti enemmän aikaa. (Maltamo ym., 2008; Vastaranta ym., 2009; Holopainen ym., 2014).

1.2 Työn tausta ja tavoitteet

TLS-mittaukset tarjoavat millimetrin tarkkuudella informaatiota ympäröivästä ympäristöstä. Sen avulla saadaan mitattua monia metsämittauksille tärkeitä parametreja nopeasti, luotettavasti ja tulevaisuudessa automaattisesti algoritmien kehittyessä. Arvioiden mukaan TLS-mittauksia tullaan tulevaisuudessa hyödyntämään yleisesti metsämittauksissa heti kun seuraavat kohdat toteutuvat: (1) mittaustulosten käsittelyä varten on kehitetty käytännöllinen ja erityisesti metsämittauksille tarkoitettu sovellus, (2) metsämittauksiin parhaiten soveltuva laserkeilain ja mittausasetelma on tiedossa sekä (3) yleinen tietoisuus laserkeilainten hyödyntämisestä metsämittauksissa laajenee suuremman yleisön tietoisuuteen. (Liang ym., 2016).

TLS-keilaimia on monenlaisia, mutta niiden tekniset toimintaperiaatteet jakautuvat kahteen osaan: pulssilaserkeilaimiin (Time-of-Flight, ToF) ja vaihe-erolaserkeilaimiin (Phase-Shift, PS). Mittaustarkkuudeltaan ja mittausetäisyydeltään keilaimet eivät poikkea paljon toisistaan. Pulssikeilaimia on pidetty perinteisesti hitaampana mittausmenetelmänä, jolla mahdollistetaan pidemmän kantaman mittauksia. Vastaavasti vaihe-erolaserkeilaimia on pidetty nopeina ja lyhyen kantamatkan keilaimia. Tämä ero on kuitenkin viime vuosien aikana saatu kurottua kiinni. Ainoa suuri ero on keilainten mittaustavoissa, jotka eroavat toisistaan merkittävästi. (Wehr ja Lohr, 1999; Heritage ja Large, 2009; Cronvall ym., 2012).

Tässä tutkimuksessa keskityttiin tämän luvun ensimmäisessä kappaleessa mainittuun kohtaan (2). Jotta TLS-mittauksia voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää laajamittaisesti metsämittauksissa, tulee tietää mitkä keilaimet kyseisiin mittauksiin soveltuvat parhaiten. Samalla tulee tietää, miten paljon mittausasetelmat vaikuttavat mittaustuloksiin. Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia PS- ja ToF-keilainten eroja metsien TLS-mittauksissa. Koealat keilattiin molemmilla keilaimilla kahdessa eri mittausasetelmassa.

Tutkimuksen ensimmäinen päätavoite oli verrata kahden eri keilaintyyppin läpäisevyyttä latvuksissa. Tämä toteutettiin siten, että mitatusta aineistosta pyrittiin löytämään jokaisen yksittäisen puun korkein mitattavissa oleva kohta runkokäyrästä. Lähempänä latvaa olevan rungon osuus on yleensä haastava mitata, koska runko jää oksien, lehtien tai neulasten taakse piiloon. Näin ollen, mitä korkeammalta runkokäyrä saadaan mitattua, sen parempi laserkeilaimen läpäisevyys on. Tutkimuksen toinen päätavoite oli selvittää erot puiden latvojen näkyvyydessä kahden keilaimen välillä. Etenkin tiheissä metsissä korkeiden puiden latvat näkyvät TLS-mittauksissa heikosti, koska latvukset peittävät latvojen näkyvyyden. Edelleen, jos toinen keilaintyyppi näkee puiden latvat paremmin kuin toinen, tarkoittaa se sitä, että keilaimen läpäisevyys latvuksessa on parempi. Läpäisevyys vaikuttaa myös mitattavissa olevien puiden lukumäärään. Työssä tarkasteltiin myös sitä, miten läpäisevyys vaikuttaa havaittujen puiden lukumäärään. Näin ollen työn tutkimuskysymys oli seuraavanlainen:

1. Miten pulssikeilaimella (ToF) ja vaihe-erolaserkeilaimella (PS) tehtävät puustomittaukset eroavat toisistaan?
 - a. Ero rungon mitattavuuden kannalta.
 - b. Ero latvojen näkyvyyden kannalta
 - c. Ero mitattavissa olevien puiden lukumäärän kannalta.

Tutkimus toteutettiin keilaamalla 24 koe-alaa kahdella eri keilaimella (ToF ja PS) täsmälleen samoista kohdista. Keilattavat koemetsät sijaitsevat Evo-tutkimuskeskuksessa. Jokainen

koeala keilattiin viidestä eri kohtaa, jolloin saatiin mahdollisimman moni puu näkyviin. Saman koealan yhdellä keilaimella tehdyt keilaukset yhdistettiin yhdeksi pistepilveksi, jonka jälkeen aineiston sisältämät puut mitattiin. 24:stä koealasta valittiin kuusi koealaa jatkotutkimusta varten. Valittujen koealojen aineistot mitattiin manuaalisesti, jolloin jokainen yksittäinen puu käytiin läpi MicroStation-ohjelmalla. Tämän lisäksi koealat mitattiin Xinlian Liangin kehittämällä algoritmilla, joka tunnisti ja mittasi puut automaattisesti. Algoritmista kerrotaan lisää luvussa 4.3.2. Lopuksi saadut mittaustulokset verrattiin keskenään.

Hypoteesi tälle tutkimukselle oli, että pulssikeilainten läpäisevyys on parempi kuin vaihe-erokeilaimissa, kun kyse on metsämittauksista. Pulssikeilaimella lähetetyt laserpulssit, jotka osuvat osittain lehteen ja osittain puun runkoon, saadaan rekisteröityä joko lehdestä tai puunrungosta, jolloin mittaustulos ei vääristy. Vaihe-erokeilainten mittaustulos vääristyy tapauksissa, joissa lasersäde osuu useampaan kuin yhteen kohteeseen. Tämä tekee pulssimittauksista läpäisevämmän verrattuna vaihe-eromittauksiin.

1.3 Työn rakenne

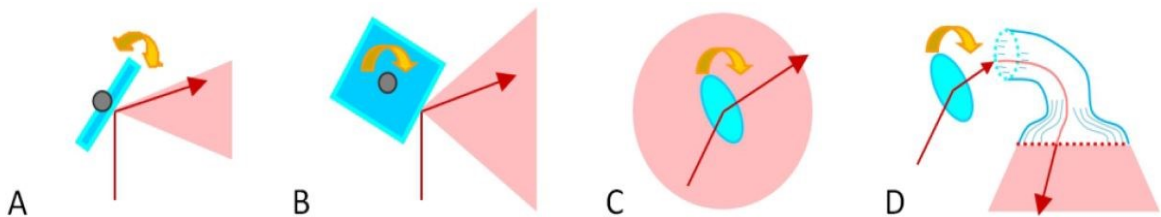
Luku 2 sisältää kirjallisuuskatsauksen liittyen laserkeilaimiin ja niiden sovelluksista metsämittauksissa. Luvussa käydään tarkemmin laserkeilainten tekniset ominaisuudet ja toimintaperiaatteet, erilaiset keilaintyyppit sekä erilaisten keilainten käyttösovellukset metsämittauksissa. Luvussa 3 esitetään aiemmat tutkimukset liittyen metsien maalaserkeilaukseen. Lukuun on koottuna aikaisempien tutkimusten tuloksia ja pohdittu niiden eroja keskenään. Luvussa 4 käydään läpi tämän työn varsinainen tutkimus, jossa pulssi- ja vaihe-erokeilainten välisiä eroja tutkitaan. Tällöin käydään läpi tutkimuksen eri vaiheet: aineiston keruu, esikäsitteily sekä puustomittaukset. Viidennessä luvussa käydään läpi tutkimuksen tulokset. Luku 6 sisältää tutkimustuloksiin liittyvää pohdintaa ja luku 7 tutkimuksen yhteenvedon.

2 Laserkeilaimet

2.1 Lasersensorin toimintaperiaatteet

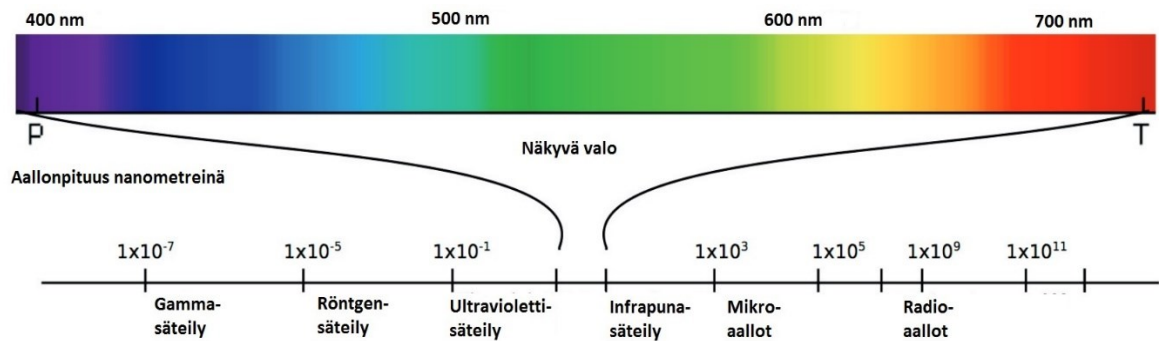
Laserkeilain on laite, joka mittaa ympäristöönsä käyttäen LiDAR-tekniikkaa hyväksi (Light Detection And Ranging, laserilla toteutettava havaitseminen ja etäisyysmittaus). Tuloksena saadaan useista miljoonista pisteistä koostuva pistepilvi, jossa pisteiden väliset etäisyydet tunnetaan jopa millimetrin tarkkuudella. Näin ollen mitatut pisteet tunnetaan halutussa 3D-koordinaatistossa. Laserkeilaimen toimintaperiaate perustuu keilaimen lähettämään lasersäteeseen, joka heijastuu kohteesta takaisin keilaimen sensoriin. Lähetetystä ja vastaanotetusta säteestä saadaan laskettua mitatun pisteen etäisyys. Mittaus voidaan tehdä usealla tavalla, mutta laserkeilaimissa käytetään pääosin kahta menetelmää: vaihe-eromittaus (Phase-Shift, PS) sekä pulssimittaus (Time-of-Flight, ToF). PS-etäisyysmittaus perustuu nimensä mukaisesti laserpulssin vaihe-eron mittaamiseen, kun taas ToF-mittaus perustuu lasersäteiden kulkuajan mittaamiseen. (Liang ym., 2016; Seitz, 2007)

Keilaimessa on yleensä lasersäteiden lähettävän osan ja säteiden rekisteröivän osan lisäksi peili, tai jokin muu osa, jolla säteet saadaan kohdennettua ja kerättyä halutusta suunnasta. Erilaiset vaihtoehdot säteiden suuntaamiseksi on esitetty kuvassa 1, jossa skannattava alue on esitetty punaisella. Lasersäteiden suuntaamista voidaan muun muassa toteuttaa heiluvalla peilillä, polygonilla, vinopeilillä tai optisella kuidulla. Näiden osien avulla mahdollistetaan usein 360 astetta kattava keilaus, joka on erityisen tärkeää esimerkiksi metsämittauksissa. (Kukko, 2013)



Kuva 1: Lasersäteiden suuntaamismenetelmät; A: Heiluva peili, B: polygoni, C: vinopeili ja D: optinen kuitu. (Kukko, 2013)

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) itsessään on laite, joka tuottaa valoa. Laserin tuottama valo on aallonpituudeltaan koherenttia säteilyä. Toisin sanoen laserin lähettämä valo sisältää vain yhden aallonpituuden säteilyä. Usein säteilyalue vaihtelee 500-1500 nm välillä. Kuten kuvasta 2 nähdään, kuuluu aallonpituuden vaihteluväli joko näkyvän valon tai infrapunaa alueelle. Lasersäde, kuten kaikki muu sähkömagneettinen säteily, kulkee valonnopeudella. Sähkömagneettiset säteilyt eroavat toisistaan niiden aallonpituuden, intensiteetin ja taajuuden suhteen. Kuva 2 esittää yleisemmän sähkömagneettisen säteilyn jaottelun aallonpituuden mukaan. (Heritage ja Large, 2009; Vosselmann ja Maas, 2010).



Kuva 2: Sähkömagneettisen säteilyn spektri. Ylempänä valon aallonpituudet ja alla kaikki sähkömagneettiset aallonpituudet. (Muokattu lähteestä Pölönen, 2013)

Lasersäde on lähetyvaiheessa muodoltaan yleensä pyöreä ja sen peittämää aluetta kohteessa kutsutaan jalanjäljeksi. Jalanjäljen koko vaihtelee paljon riippuen keilaimen käyttötarkoituksesta. Tyypillisesti keilainten jalanjäljet jaetaan isoihin ja pieniin. Esimerkiksi maalaserkeilaimissa lasersäteen koko kohteessa vaihtelee välillä 2-100 millimetriä. Nämä keilaimet ovat pienemmän jalanjäljen keilaimia. Vastaavasti isompi ja epätarkempi jalanjälki syntyy ilmalaserkeilaimista, missä lasersäteen koko kohteessa vaihtelee usein välillä 5-25 metriä. Lisäksi on huomioitava lasersäteen muoto sen osuessa kohteeseen. Ellei kohde ole täysin kohtisuorassa keilaimen keilaussuuntaa kohden, ei pyöreä lasersäde piirry kohteeseen täydellisenä ympyränä vaan enemmän tai vähemmän soikean muotoisena. (Kukko, 2013; Vosselman ja Maas, 2010)

Laserkeilain laskee mitatun pisteen etäisyyden lisäksi myös pisteen intensiteettiä. Intensiteetti tarkoittaa tässä tapauksessa palaavan lasersäteilyn voimakkuutta. Pisteen intensiteetin suuruus riippuu kohteen etäisyydestä, väristä, pintamateriaalista, heijastuvuudesta sekä muodosta. Mitä voimakkaammin pulssi palautuu keilaimeen, sitä heijastavampi on kohteen pinta. Näin ollen intensiteettiä voidaan perusteella pystytään tekemään johtopäätöksiä kohteen ominaisuuksista. Intensiteettiä voidaan mitata usealla menetelmällä ja siksi eri valmistajien keilaimet mittaavat intensiteettiä usein eri tavalla. Tämän takia intensiteettikalibrointi on usein välttämätön tilanteissa, joissa intensiteettiarvojen perusteella halutaan päätellä mittaustarkoituksen ominaisuuksia. (Holopainen ym., 2013; Kaasalainen, Kukko ja Hyypä, 2011)

Intensiteettiä voidaan helposti poistaa pistepilvestä ei-toivotut pisteet, jolloin jäljelle jätetään vain mittauksen kannalta mielenkiintoiset pisteet. Esimerkiksi puustomittauksissa voidaan tarvittaessa intensiteettiä perusteella jättää intensiteettiänsä puunrunkoja parhaiten vastaavat pisteet näkyviin, jolloin lehdet ja muu mittaukselta häiritsevät osat poistetaan. Myös puulajitulkintaa voidaan tehdä intensiteettiänsä perusteella. Eri puulajien lehdet ja rungot heijastavat lasersäteilyä eri tavalla. (Holopainen ym., 2013; Kaasalainen, Kukko ja Hyypä, 2011).

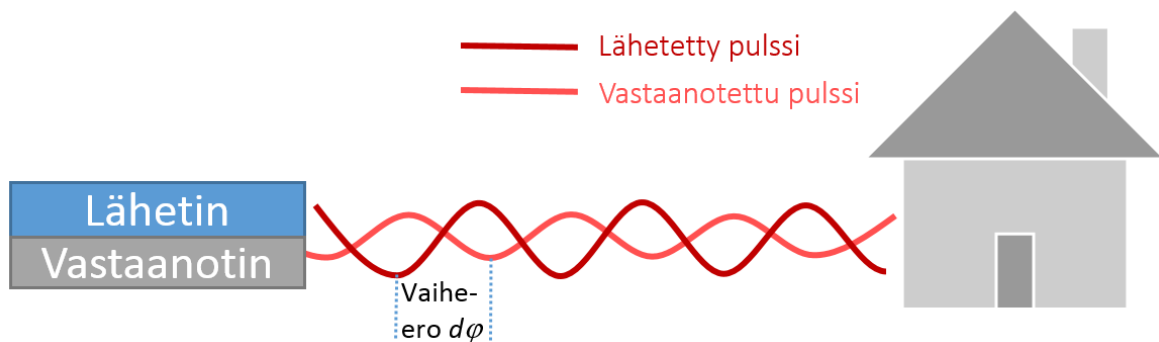
2.1.1 Vaihe-erokeilaimet (Phase-Shift, PS)

Vaihe-erokeilainten käyttämisessä vaihe-eromittauksessa lähetetään jatkuvalla syötöllä lasersäteilyä. Tällöin etäisyys saadaan laskettua vertailemalla lähtevän ja vastaantulevan signaalin sinimuotoista aaltoa ja laskemalla niiden välinen vaihe-ero. Lisäksi tulee tietää kohteen ja keilaimen väliin jäävien kokonaisten aaltojen lukumäärä. Lasersäteilyä amplitudi-moduloidaan sinimuotoisella signaalilla ennen kuin säteilyä lähetetään kohteeseen. Tätä kutsutaan

amplitudi-moduloiduksi (amplitude-modulated) lasersäteilyksi. Näin signaali saa jakson T_m ja aallonpituuden λ_m . Mittauksessa käytettävä amplitudi-moduloitu signaalin aallonpituuden taajuus tulee tietää, jotta etäisyysmittaus onnistuu. Tämän jälkeen kohteen etäisyys r saadaan laskemalla seuraavalla kaavalla:

$$r = \left(N + \frac{d\varphi}{2\pi} \right) * \lambda_0, \quad (1)$$

jossa r on etäisyys, N on siniaaltojen kokonaislukumäärä, $d\varphi$ on vastaanotetun ja lähetetyn signaalin välinen vaihe-ero ja λ_0 on lyhyin moduloitu aallonpituus. N saadaan ratkaistua käyttämällä yhtä tai useampaa moduloitua aallonpituutta λ_m ($m=1 \dots n$). Useampaa modulaatiota käytetään kahdesta syystä: (1) pidemmät etäisyysmittaukset saadaan yksiselitteisesti mitattua pidemmillä aallonpituuksilla sekä (2) etäisyysmittaus saadaan vaihe-eromittauksen avulla millimetrin tarkkuuteen useammalla aallonpituudella, koska lyhyen aallonpituuden vaihe-erot saadaan mitattua tarkemmin kuin pitkien aallonpituuksien vaihe-erot (esimerkiksi $\lambda < 1\text{m}$ verrattuna $\lambda > 50\text{m}$). Vaihe-eromittauksella saatava tarkkuus on erittäin hyvä, koska lähetetyn lasersäteilyn aallonpituus on erittäin lyhyt (n. 1 mikrometrin pituinen), eikä niin pientä tarkkuutta tarvita yleisimmissä mittaustarkoituksissa. Etäisyysmittauksen tarkkuus riippuu enemmänkin siitä, kuinka tarkkaan keilain pystyy vaihe-eron mittaamaan. (Alho ym., 2011; Shan ja Toth, 2008; Kukko, 2013)



Kuva 3: Vaihe-eromittauksen (PS) toimintaperiaate.

Vaihe-erokeilainten toimintasäde vaihtelee alle metristä muutamaan sataan metriin. Keilain on perinteisesti ollut pulssikeilaimiin nähden nopeampi ja tarkempi. Vaihe-erokeilaimilla on perinteisesti päästy 250 000 mittaukseen sekunnissa, mutta viime vuosien kehitysten myötä mittaussnopeus on kasvanut jopa miljoonaan pisteeseen sekunnissa. Esimerkiksi Faron valmistama vaihe-erokeilain Focus X130 toimintasäde on alle 130 metriä ja mittaussnopeus 976 000 pistettä sekunnissa. Mittaustarkkuudeksi saadaan 0,3 mm kymmenen metrin etäisyyteen. Mittausetäisyys on vaihe-eromittauksissa rajallinen, koska mittausetäisyys korreloi lasersäteilyn säteilytehon sekä kantoaallon modulaation kanssa. Säteilytehon tulisi olla todella voimakas, jotta sillä saataisiin mitattua pidempiä matkoja. Lisäksi kantoaallon modulaatiosta tulisi tuolloin pidempi, jolloin mittaustarkkuus ei olisi enää kovin hyvä. Kuvassa 3 on esitetty vaihe-eromittauksen toimintaperiaate pelkistetysti. (Cronvall ym., 2012; Faro, 2014; Shan ja Toth, 2008)

2.1.2 Pulssikeilaimet (Time-of-Flight, ToF)

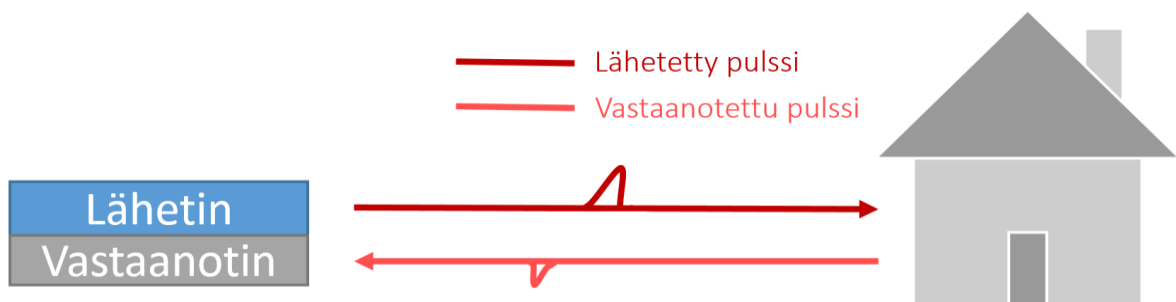
Pulssikeilainten käyttämä pulssimittaus tuli ensimmäisen kerran tunnetuksi radioaaltojen keskuudessa. Ensimmäiset perusteelliset tutkimukset asiasta voidaan jäljittää 1880-lukuun,

jolloin Hertz tutki asiaa ensimmäisen kerran. Tuolloin radioaaltoja lähetettiin ympäristöön, jolloin radioaallon heijastuessa kohteesta takaisin saatiin laskettua kohteen etäisyys. Tarkoituksena oli hyödyntää pulssimittauksia tutkana. 1950-luvun loppupuoliskolla lasertekniikan tehdessä tuloa, syntyivät pulssimittausten uudet soveltamismahdollisuudet. Laserilla oli mahdollista päästä radioaaltoja huomattavasti parempaan resoluutioon, koska laserin käyttämä aallonpituus vaihtelee 400-1500 nanometrillä luokassa ja radioaallot pienimmillään senttimetrin luokassa (kuva 2). Laserin kanssa käytettävä pulssimittauksen teoreettinen perusta oli kuitenkin täysin sama kuin radioaaltojen kanssa käytetty teoria. (Skolnik, 1970; Vosselmann ja Maas, 2010)

Pulssimittauksen perusta perustuu valonnopeuden tuntemiseen. Koska valonnopeus on ilmassa vakio, voidaan etäisyys tietää laskemalla valon kulkema aika. Vielä kun tiedetään, että valo kulkee saman matkan kahteen kertaan (meno-paluu), saadaan kohteen etäisyys laskettua seuraavasta kaavasta:

$$r = \frac{dt * c}{2}, \quad (2)$$

jossa dt on säteen kulkema aika keilaimesta kohteeseen ja takaisin ja c on valonnopeus. Vielä kun tiedetään laseriodin lähettämän energiapulssin kahden suuntakulman suunnat, saadaan kohteelle paikka mittauslaitteen omassa 3D-koordinaatistossa. Toisin kuin vaihe-eromittauksissa, pulssimittauksissa lähetetään jatkuvan lasersäteilyn sijasta yksittäisiä laserpulseja. Alla olevassa kuvassa 4 on esitettyä pulssimittauksen toimintaperiaatteet. (Kukko, 2013).



Kuva 4: Pulssimittauksen (ToF) toimintaperiaate.

Pulssimittauksissa on hyvänä puolena se, että sillä voidaan mitata kohteesta useampia kaikuja. Tämä tarkoittaa sitä, että kun laserpulssin jalanjälki osuu esimerkiksi osittain lähempänä olevaan lehteen ja osittain kauempana olevaan runkoon, palautuu lehteen osunut laserpulssi takaisin ensin, jonka jälkeen runkoon osunut pulssi palautuu hieman myöhemmin. Havainnollistava kuva esimerkistä löytyy kuvasta 5 luvussa 2.2.1 (sivu 10). Useat keilaimet pystyvät mittaamaan vähintään neljä tai viisi kaikuja. Ilmalaserkeilaimet hyödyntävät pääosin ainoastaan pulssimittauksia. Ne tallentavat mittaushetkellä ainakin ensimmäisen ja viimeisen kaiun, koska ensimmäinen kaiku on puun latvasta ja viimeinen kaiku todennäköisesti maanpinnalta. (Vosselmann ja Maas, 2010; Kukko, 2013)

Usean kaiun mittaaminen tekee pulssimittauksesta tehokkaamman esimerkiksi kasvillisuusalueiden keilaamisessa. Näin keilain pystyy mittaamaan paremmin lehtien taakse jäävää aluetta, jolloin pulssikeilaimet soveltuvat teoriassa metsämittauksiin paremmin kuin vaihe-

erokeilaimet. Pulssikeilaimet soveltuvat myös paremmin pitkän kantaman mittauksiin. Puls-sikeilaimilla on mahdollista mitata parhaimmillaan jopa kilometrin päässä olevaa kohdetta, mutta tyypillisesti mittausetäisyys on muutamia satoja metrejä. (Hofton ym., 2000; Wagner ym., 2006; Liang, 2016)

Pulssikeilaimen huonona puolena on pidetty perinteisesti sen hitautta, joka on ollut useita tuhansia mittauksia sekunnissa (Cronvall ym., 2012). Kuitenkin viimeisen muutaman vuoden aikana kehitystä on tapahtunut pulssikeilainten keskuudessa paljon niin sensorien kuin algoritmien kanssa. Esimerkiksi Leican valmistama ScanStation P40 keilain kykenee parhaimmillaan miljoonan pisteen mittaukseen sekunnissa 270 metrin etäisyyteen. Pidemmällä etäisyydellä mittaus on luonnollisesti hitaampaa, koska keilaimen täytyy odottaa pidempään pulssin palautumista takaisin keilaimeen. Toistotaajuus määrittää monissa pulssikeilaimissa toimintaetäisyyden. Toistotaajuus tarkoittaa mittaushavaintojen lukumäärää sekunnissa. Myös tarkkuuden kanssa on tapahtunut paljon kehitystä. Samalla P40 keilaimella päästään parhaimmillaan 0,8 mm tarkkuuteen 10 metrin päähän keilaimesta. Vastaavasti vaihe-erokeilaimia on perinteisesti pidetty pulssikeilaimia nopeampana ja tarkempana, mutta tämä ero on viimeisten muutamien vuosien aikana kurottu yhä pienemmäksi niin nopeuden kuin tarkkuuden suhteen. (Cronvall ym., 2012; Holopainen ym., 2013; Leica ScanStation P30/P40, 2015a; Leica Scanstation P30/P40, 2015b)

2.2 Laserkeilainten mittausalustat

Laserkeilaimia on monenlaisia riippuen keilaimen käyttötarkoituksesta. Yleisin tapa jaotella keilaimet on jakaa ne toiminta-alustan perusteella. Tällöin laserkeilaimet jakautuvat neljään suurempaan pääryhmään: ilmalaserkeilaus (ALS), maalaserkeilaus (TLS), liikkuva laserkeilain (Mobile Laser Scanning, MLS) sekä henkilökohtaiset keilaimet (Personal Laser Scanner, PLS). Vaikka keilaimet jaotellaan usein edellä mainittuihin ryhmiin, on keilainten perustoimintaperiaate teknisesti hyvin samanlainen. Tässä luvussa käsitellään ilma-, maa-, liikkuvia sekä henkilökohtaisia laserkeilaimia.

2.2.1 Ilmalaserkeilain

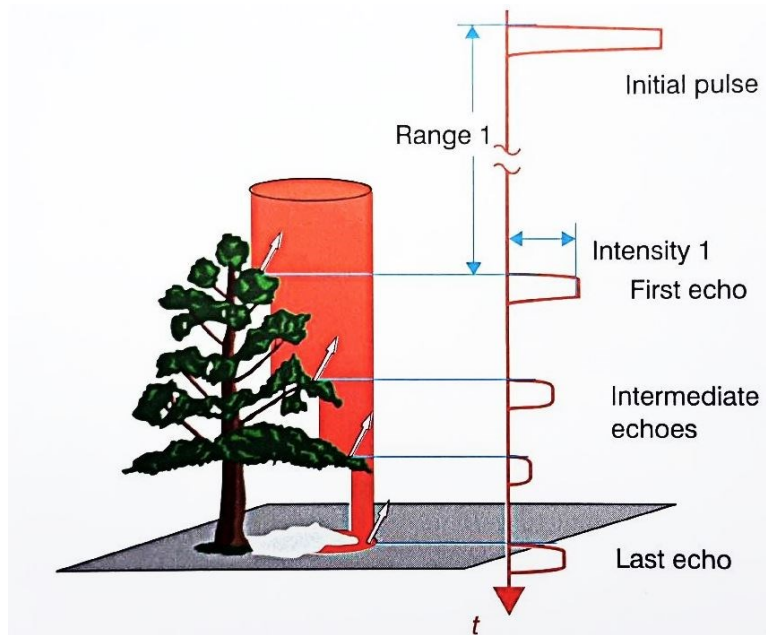
Ilmalaserkeilausta alettiin tutkia jo 1970-luvun alkupuoliskolla ja tällöin todettiin, että lentokoneesta lähetettävällä laserilla pystytään mittaamaan koneen ja kohteen etäisyys alle metrin tarkkuudella. Kuitenkaan laseriin perustuva etäisyysmittaus ei tuolloin vielä levinnyt laajempaan käyttöön kahdesta syystä. Ensimmäkin, jotta mittaustulos olisi luotettava, tuli lentokoneen asento mittaushetkellä tuntea. Toiseksi lentokoneen paikka täytyi myös olla mittaushetkellä tiedossa. Vasta 1980-luvun lopulla, nämä ongelmat saatiin ratkaistua. GPS-paikannusjärjestelmän yleistyessä koneiden sijainnit saatiin mittaushetkellä selvitettyä. Tämän lisäksi mittaussäätteen asentoa mittaava IMU (Inertial Measurement Unit) oli sen verran kehittynyt, että sitä voitiin hyödyntää ilmalaserkeilauksessa. (Walsh, 1984; Kabrill ym., 1984; Krabill, 1989)

Ilmalaserkeilainta käytetään nimensä mukaisesti ilmasta, joten sen mittausalustana on viime päiviin asti toiminut pääsääntöisesti lentokone. Keilausinstrumenttien ja IMU-laitteiden kehittyessä ja pienentyessä ALS-keilaimia on voitu käyttää myös lennokeissa ja helikoptereissa, mikä on puolestaan mahdollistanut entistä matalampia lentokorkeuksia. Lentokorkeus vaihtelee mittaustarkoituksen mukaan 60–1500 metrin välillä. Lennot tehdään yleensä nauhamaisina lentolinjoina ja linjojen väliset etäisyydet voivat olla jopa 100 metriä. Pulssitiheys on tavanomaisesti 7 000–125 000 mittausta sekunnissa ja maaston pistetiheys 0,06–25 pistettä yhtä neliometriä kohden. Kokonaisvaltaisen ALS-mittauksen suorittaminen vaatii

vähintään seuraavat instrumentit: laserkeilain, keilausalusta (esimerkiksi lentokone), paikannuslaitteisto (esimerkiksi GPS) sekä koneen asentoa seuraava inertiaalijärjestelmä (IMU). Yhdistämällä keilaimen etäisyysmittauksen avulla saatu tieto, IMU:n avulla mitattu keilaimen asento sekä paikannuslaitteiston avulla saatu sijainti, saadaan mittauspisteen sijainti määritettyä valitussa koordinaatistossa. (Cronvall ym., 2012).

Vuosien saatossa GPS-vastaanottimet ovat korvautuneet GNSS (Global Navigation Satellite Systems) –vastaanottimilla. GNSS vastaanottimet pystyvät vastaanottamaan amerikkalaisten GPS-satelliittien tietojen lisäksi myös muiden maiden, kuten venäläisten kehittämä GLONASS (Globalnaja Navigatsionnaja Sputnikovaja Sistema), eurooppalaisten kehittämä Galileo sekä kiinalaisten kehittämä Beidou, satelliittien parametrit. Näin GNSS-vastaanottimilla saadaan nopeampia, luotettavampia ja tarkempia tuloksia kuin pelkällä GPS-vastaanottimella. (Liu ym., 2016; Næsset ym., 2004).

Ilmasta lähetettävä laserpulsssi on maahan osuessaan huomattavasti suurempi kuin pelkkä yksi pieni piste. Tämän takia yksi laserpulsssi voi osua useampaan kohteeseen. Osa keilaimista kykenee tallentamaan lähetetystä pulssista useamman takaisin tulevan kaiun. Kuvassa 5 on esitetty kuinka yksittäinen laserpulsssi voi saada useamman kaiun mittausinstrumenttiin. Näin ollen ensimmäinen kaiku voidaan saada ensin puun latvasta ja viimeinen maanpinnasta. (Jaakkola ym., 2010; Cronvall ym., 2012).



Kuva 5. Yhden lähetetyn ALS-pulssin aiheuttamat useat kaiut. Kyseessä ToF-mittaus. (Muokattu lähteestä Vosselman ja Maas, 2010)

Tällä hetkellä ALS-mittaukset ovat yleisessä käytössä erityisesti maanpintamallien kartoittamisessa. Näin maanpinnan korkeusvaihtelut saadaan hyvinkin kustannustehokkaasti mitattua. Samasta aineistosta voidaan yleensä mitata maanpinnan korkeusvaihteluiden lisäksi yksilöllisiä kohteita, kuten puita, taloja ja siltoja. Lisäksi kolmiulotteista laseraineistoa voidaan hyödyntää esimerkiksi monenlaisen ekologisen informaation tuottamisessa. Maanpintamallien kartoittamiseen paras ajankohta on yleensä kevät tai syksy, jolloin puiden oksissa

ei ole lehtiä. Tällöin saadaan parempi näkyvyys korkeiden puiden alle. ALS-mittaukset onnistuvat myös kesäaikaan, koska useimmiten osa yksittäisistä lasersäteistä onnistuu pääsemään lehtien läpi maanpintaan asti. (Maltamo ym., 2008; Cronvall ym., 2012).

2.2.2 Liikkuva laserkeilain (MLS)

Liikkuva laserkeilain (Mobile Laser Scanner, MLS) toimii samalla periaatteella kuin ilma-laserkeilain paitsi, että erona on keilaimen alusta. Alustana toimii maassa tai vedessä liikkuva kulkuneuvo, joka voi olla esimerkiksi auto, mönkijä tai moottorivene. MLS esiteltiin konseptina ensimmäisen kerran 1980-luvulla, jonka jälkeen 1990-luvun alussa Ohio State Yliopiston Center of Mapping -yksikkö kehitti ensimmäisen MLS-järjestelmän. Siitä lähtien on kehitetty useita prototyyppisiä ja kaupallisia järjestelmiä, jonka johdosta erilaisia MLS-keilaimia, niiden sensoreita sekä käyttösovelluksia on syntynyt huomattavan paljon. (Goad, 1991; Cabo ym., 2016)

Vaikka kehitystä on tapahtunut vuosikymmenten aikana paljon, ovat MLS-järjestelmän perusyksiköt aina olleet samoja. MLS-järjestelmä koostuu ALS-järjestelmän tavoin laserkeilaimesta (keilaimia voi olla useampia), keilaimen asentoa seuraavasta inertiaalijärjestelmästä (IMU), paikannuslaitteistosta (GNSS) sekä mittausalustasta (esimerkiksi henkilö-auto). MLS mittauksissa käytetään usein samoja keilaimia kuin TLS-mittauksissakin, joten keilainten etäisyysmittaukset perustuvat niin vaihe-ero- kuin pulssimittauksiin. (Cabo ym., 2016; Cronvall ym., 2012)

Liikkuva laserkeilaus on nopea ja joustava tapa saada ympäristöstä 3D-aineistoa. MLS:lla saadaan mitattua alueita, joita ei ole mahdollista mitata ALS:n avulla. Liikkuvuuden ansiosta saadaan keilattua isompipakin alueita kohtuullisessa ajassa. Esimerkiksi Zhang'in tutkimuksessa (Zhang ym., 2016) laserkeilain asetettiin junaan tarkoituksena keilata sähkölinjoja. Mittaushetkellä juna kulki 120 km/h. Tällöin onnistuttiin saamaan pistepilviaineisto, jossa oli keskimäärin 3000 pistettä neliometriä kohden. Tämä pistemäärä oli huomattavasti enemmän kuin mitä ALS-keilauksella saadaan keskimäärin. Pistetiheys jäi kuitenkin kauas maastolaserkeilauksesta. Siksi mobiililaserkeilausta pidetäänkin ilma- ja maalaserkeilauksen välimuotona niin mittausnopeuden kuin –tarkkuuden suhteen. (Kukko ym., 2012; Zhang ym. 2016)

MLS-mittauksiin luetaan myös henkilökohtaiset laserkeilaimet (Personal Laser Scanner, PLS). Ensimmäiset ajatukset PLS-keilainten kehittämiseen lähtivät reppukeilaimista. Tarkoituksena oli saada laserkeilain mittaamaan ympäristöä samalla, kun se on käyttäjänsä reppuun kiinnitetty. Geodeettisen laitoksen ensimmäinen prototyyppi julkaistiin vuonna 2011 ja sen painoksi tuli noin 25 kg. Suurin osa tuosta painosta koostui akuista, jotka voidaan tulevaisuudessa saada entistä kevyemmiksi. Tämä reppukeilaimen prototyyppi vaati mittaushetkellä kaksi kantajaa. (Kukko ym., 2012). Ensimmäisen prototyypin jälkeen kehitystä tapahtui nopeasti muutamien vuosien sisällä. Vuonna 2013 Geodeettisellä laitoksella onnistuttiin rakentamaan 10 kg painava selkään laitettava PLS, jolloin siitä tuli entistä kompaktimpi ja paremmin käyttötarkoitukseensa sopiva. (Liang ym., 2014a).

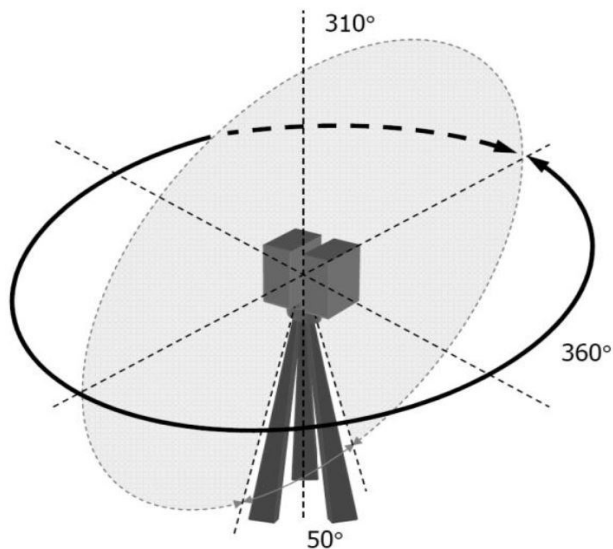
PLS-mittausten suurin hyöty ovat niiden liikkuvuus ja käytettävyys vaikeissakin maastoissa. PLS-mittaukset ovat MLS-mittauksiin nähden parempia liikkuvuuden kannalta. Niiden avulla päästään vaikeisiin kohteisiin helposti, koska niiden tarkoitus on kulkea ihmisen mukana mittaushetkellä. Samalla ne ovat TLS-mittauksia nopeampia, koska mittaus tapah-

tuu suoraan liikkeestä, eikä keilaimia tarvitse erikseen pystyttää jalustalle. Koska PLS-mittauksissa voidaan käyttää samoja keilaimia kuin TLS-mittauksissakin, päästään hyvinkin tarkkoihin mittaustuloksiin. Kuten muutkin MLS-mittaukset, vaatii PLS-mittaus paikannuslaitteiston (GNSS) sekä inertiaalijärjestelmän (IMU), jotta jokaisen keilaushetken asento ja sijainti tunnetaan. GNSS ja IMU tuovat omalta osaltaan virheitä lopulliseen pistepilveen, joten PLS-mittaukset jäävät TLS-mittausten tarkkuudessa hieman jälkeen. (Liang ym. 2014a)

2.2.3 Maalaserkeilain (TLS)

Maalaserkeilaus (Terrestrial Laser Scanning, TLS) on laseriin perustuva mittauslaitteisto, jolla saadaan mitattua ympäristöä hyvinkin tarkkaan käyttäen hyväksi erittäin tarkkoja kulmamittauksia sekä LiDAR-tekniikkaa. TLS tunnetaan myös nimityksellä maakäyttöinen LiDAR (ground-based LiDAR). Mittausten tuloksena saadaan kohteen pisteelle tarkka etäisyys ja sijainti lasersäteen lähettäjään nähden 3D-koordinaatistossa. Toisin kuin muut aiemmissa luvuissa mainitut keilausmenetelmät, maalaserkeilauksessa mittausalusta on paikallaan, jolloin kyse on staattisesta mittauksesta. Staattinen mittaus tekee mittaamisesta tarkempaa, koska pistepilven yhdistäminen ei vaadi IMU:a eikä välttämättä GNSS –mittauksia. Skannausmekanismien ansiosta saadaan mitattua TLS-laitteiston ympäristöä hyvinkin tarkkaan erittäin nopeassa ajassa (esimerkiksi nykypäivän keilaimilla miljoona pistettä sekunnissa). Maalaserkeilainten etäisyysmittaukset perustuvat pääosin PS-tekniikkaan. Kuitenkin viime aikoina tekniikan kehittyessä ToF-mittaukset ovat yleistyneet TLS-keilainten keskuudessa. ToF-tekniikkaan perustuvaa TLS-kalustoa käytetään usein mittauksissa, jossa etäisyydet ovat hieman pidempiä ja joissa mittausnopeudella ei ole niin suurta merkitystä. Vastaavasti PS-menetelmällä toimivia TLS-laitteistoja käytetään enemmän nopeissa mittauksissa, joissa kohde on alle 100 metrin päässä. Kuitenkin PS- ja ToF-tekniikoiden välinen ero on saatu viime aikoina kurottua kiinni niin mittausnopeuden kuin –tarkkuuden suhteen. (Liang ym., 2016; Cronvall ym., 2012).

Ympäristön mittaaminen TLS-laitteistolla tapahtuu usein kahden liikkuvan osan avulla. Keilaimen peili pyörii pystysuunnassa, jolloin sillä saadaan mitattua pystysuorassa tasossa usein 310 astetta. Katveeseen jäävä 50 astetta johtuu itse keilauslaitteesta, koska keilaimen runko tulee tielle peilin osoittaessa alaspäin. Keilainten pystysuuntainen näkeminen saattaa vaihdella huomattavan paljon eri valmistajien ja mallien välillä. Toinen liikkuva osa on itse keilain. Keilaimen pohjassa on moottori, joka liikuttaa keilainta vaakatasossa. Koska pystysuuntainen liike kuvaa molemmilta puolilta, ei keilaimen tarvitse pyöriä enempää kuin 180 astetta vaakatasossa. Näin mahdollistetaan vaakatasossa 360 asteen kuvantaminen. Näiden kahden pyörimisliikkeen ansiosta keilain onnistuu skannaamaan lähes koko ympäristönsä lukuun ottamatta katvealuetta. Kuvassa 6 on esitettyinä keilaimen kuvausalueet. (Liang ym., 2016)



Kuva 6: Maalaserkeilaimen toimintamekanismi (lainattu lähteestä Liang, 2013).

TLS-laitteisto on kokenut valtavasti muutosta viimeisten kahden vuosikymmenen aikana. Erityisesti hinnan, koon ja painon suhteen on tapahtunut paljon muutoksia. TLS-laitteista on saatu edullisempia, nopeampia, tarkempia sekä kevyempiä. Nykyisin TLS-kalustoa valmistavat muun muassa FARO, Leica Geosystems, Trimble, sekä Zöller&Fröhlich ja niillä voidaan päästä jopa miljoonaan mittauspisteeseen sekunnissa 100-300 metrin etäisyydellä. Painoa keilaimilla on yleensä 5-15 kiloa. Esimerkiksi FARO:n valmistama Faro Focus X330 painaa 5,2kg. TLS-keilaimia saa erilaisilla ominaisuuksilla ja oheislaitteilla, mutta yleisesti keilaimen myyntihinta vaihtelee 30 000 ja 80 000 euron välillä. (Liang ym., 2016).

Uusimmat tutkimukset TLS-järjestelmään liittyen osoittavat, että TLS-laitteisto kykenee lähettämään mittaussvaiheessa useampaa aallonpituutta. Pääosin tutkimus painottuu kahden aallonpituuden lähettämiseen, mutta myös useampaa aallonpituutta lähettäviä keilaimia on tutkittu. Usealla eri aallonpituudella tehtävä mittaus mahdollistaa entistä tarkemmin kohteen luokittelun, koska eriväriset ja -pintaiset kohteet heijastavat eri tavalla eri aallonpituuksia. Esimerkiksi metsämittauksissa voitaisiin tällöin luokitella lehdet, oksat ja maaperä toisistaan aikaisempaa helpommin. (Pirotti ym., 2013; Calders ym., 2014; Puttonen ym., 2015; Douglas ym., 2015)

Maalaserkeilaimiin lasketaan myös teollisuuslaserkeilaimet, jotka ovat tarkoitettu erittäin pienien kohteiden hyvin tarkkaan mittaamiseen. Teollisuuskeilaimella tehtävät mittaukset ovat muiden TLS-mittausten tavoin staattisia mittauksia eli keilaimen alusta on paikallaan. Teollisuuskeilaimissa on harvemmin liikkuvaa moottoria, jolla saisi koko ympäristön mitattua. Nämä keilaimet asetetaan tiukasti paikalleen osoittamaan mitattavaa kohdetta. Yleisin toimintaperiaate on pyyhkäistä mitattava kohde lasersäteellä, jonka jälkeen heijastunut valo ohjataan objektiivin kautta sensorille. Näin ollen teollisuuskamerat perustuvat kolmiomittaukseen. Tällä mittaustavalla voidaan päästä jopa alle millimetrin mittaustarkkuuteen. Yleisimmin teollisuuskeilaimia käytetään erilaisissa teollisuuden aloilla, kuten metalliteollisuuden pienten objektien mittaamiseen. (Cronvall ym., 2012)

2.3 Laserkeilainten sovellukset

Laserkeilaimia käytetään jo nyt hyvin monessa sovelluksessa. Lisäksi uusia soveltamisen osa-alueita tulee jatkuvasti lisää. Lähes jokaisen sovelluksen tärkein tehtävä on luoda sovelluskohteesta mahdollisimman tarkka, nopea ja kustannustehokas 3D-malli, jolle voidaan suorittaa erilaisia mittauksia jälkiprosessoinnissa.

Liikkuvan laserkeilauksen (MLS) sovellusten kirjo on hyvin laaja. Ussyshkin (2009) listasi tutkimuksessaan ilmalaserkeilauksen sovelluksia ja totesi niiden pätevän myös MLS-mittauksissa. Näitä MLS:n sovelluksia ovat muun muassa topografia, logistiikka (rautatiet, autotiet ja lentokentät), kaupunkiympäristön kartoitus, tulvien riskianalyysi sekä metsämittaukset. Alho ym. (2011) totesivat tutkimuksessaan, että liikkuvaa laserkeilainta voidaan hyödyntää myös jokiympäristön kartoituksessa laittamalla keilain veneeseen ja ajamalla veneettä jokea pitkin. Näiden lisäksi liikkuvaa laserkeilainta voidaan hyödyntää kymmenissä muissa käyttökohteissa. (Ussyshkin, 2009).

Henkilökohtaisten (PLS) keilainten sovellukset ovat pääosin samat kuin MLS:n sovellukset. Liang ym. (2014) totesi tutkimuksessaan, että PLS-mittauksia voisi käyttää muun muassa metsien harvennusten suunnitteluun, lehti-indeksin määrittämiseen, metsäreitin visualisointiin tai ekosysteemin kartoitukseen. PLS-keilainten sovellukset korostuvat enemmän alueilla, joihin kulkuneuvolla on vaikea päästä. Näitä alueita ovat esimerkiksi suoalueet, tunnelit ja metsät.

Ilmalaserkeilainten (ALS) sovellukset painottuvat pääosin maanpinnan kartoittamiseen, koska ALS on osoittanut ylivoimaisuutensa nopeana, tarkkana ja kustannustehokkaana mittausmenetelmänä muihin kartoitusmenetelmiin nähden. (Maltamo ym., 2008). Muita ilmalaserkeilaimen sovelluksia ovat Ussyshkin (2009) listauksen lisäksi muun muassa ikiroudan, rakennusten, lumisuuden, ekologisuuden sekä vesistöjen kartoittaminen. Muita erikoisempia ALS-sovelluksia ovat maanvyöryjen mallintaminen, rikospaikan kartoittaminen sekä katastrofialueiden kartoittaminen. (Overton ym., 2009). ALS-mittauksia on mahdollista myös käyttää virtuaalisten ympäristöjen tekemiseen. Esimerkiksi kaupunkiympäristöstä voidaan tehdä ilmalaserkeilausaineistosta virtuaalinen kaupunkimalli, jota voidaan hyödyntää vaikkapa peliteollisuudessa (Overby ym., 2004).

Maalaserkeilaimia (TLS) sovelletaan muiden keilaintyyppien tapaan hyvin monipuolisesti erilaisissa sovelluksissa. TLS-mittauksia voidaan käyttää maankäyttötieteiden, metsätieteiden, peliteollisuuden, laadunvalvonnan, arkeologian, lääketieteen tai jopa peliteollisuuden osa-alueilla. Maankäyttöinsinöörit ovat ottaneet maalaserkeilaimet käyttöön erityisesti silta-, rakennus- sekä tunnelimittauksissa (Wang ym., 2014). Metsätieteissä TLS-mittaukset ovat mahdollistaneet erittäin tarkkoja mittaustuloksia, joita on voitu käyttää hyväksi mm. metsäinventointitietojen keräämiseen. Lisäksi tuloksilla on voitu tutkia metsien vakautta, ekologisuutta sekä luonnon monimuotoisuuden säilyttämistä. (Liang 2013; (Moskal ja Zheng, 2011).

Lääketieteessä, arkeologiassa tai peliteollisuudessa käytettävät maalaserkeilaimet saattavat olla tarkemmin ottaen teollisuuskeilaimia, joiden tarkoitus on mitata hyvin pieniä yksityiskohtia. Lääketieteessä näillä keilaimilla voidaan suorittaa alle millimetrin tarkkoja mittauksia, joiden perusteella on mahdollista kehittää erilaisia proteeseja (esimerkiksi hampaiden skannaaminen hammasproteesien tekoa varten). Arkeologiassa keilaimilla voidaan mallintaa historiallisia kohteita, jotka tulevat ajan myötä tuhoutumaan tai joille ei voida suorittaa

fyysisiä mittauksia. Näin 3D-malli mahdollistaa jälkikäteen tehtävät mittaukset ilman, että kohdetta kosketetaan fyysisesti. (Cronvall ym., 2012; Crutchley, 2009). Myös peliteollisuus on löytänyt laserkeilaimelle käyttösovelluksia. Rakennusten julkisivuista, maamerkeistä ja muista peliin soveltuvista asioista saadaan keilauksen tuloksena pistepilvi, joka on mahdollista muuttaa pelimoottoriin yhteensopivaksi. Suuremmat kohteet keilataan tavallisilla TLS-keilaimilla ja pienempiä yksityiskohtaisempia kohteita keilataan teollisuuskeilaimilla. Laserkeilaaminen on huomattavasti nopeampi tapa mallintaa ympäristöä kuin käsin tietokoneohjelmalla mallintaminen. (Merlo ym., 2012)

3 Laserkeilainten käyttö puustomittauksissa

Tässä luvussa keskitytään aikaisempiin tutkimuksiin, joissa päätavoitteena on ollut tutkia maalaserkeilaimilla tehtyjä puustomittauksia. Maalaserkeilaimilla kyetään erittäin tarkkoihin puustomittauksiin ja puiden mallintamiseen, jolloin päästään hyvin yksityiskohtaisiin geometrisiin tuloksiin. TLS-mittausten huono puoli puustomittauksissa on se, että mittaukset rajoittuvat melko pieniin alueisiin.

Useat tutkimukset ovat osittaneet, että TLS-laitteistot soveltuvat hyvin puustomittauseräparametrien ratkaisemiseen. Tutkimusten tarkoituksena on ollut pääosin tutkia TLS:n toimintatehokkuutta metsäinventoinnin, -hallinnan sekä –suunnittelun osa-alueilla. Edellä mainitut osa-alueet vaativat tarkkaa puuston geometristä tuntemusta, joista voidaan ratkaista puustomittauksiin tarvittavat parametrit. Vähimmäisvaatimuksena täytyy ratkaista useimmassa tapauksessa rinnankorkeuden läpimitta (Diameter at Breast Height, DBH) sekä puun korkeus (Height, H). Joissain tapauksissa tarvitaan myös tiedot seuraavista asioista: korkeus, josta oksat alkavat; puuston kunto; puulaji tai oksien halkaisijat. (Brenner ym., 2010). TLS-mittauksia hyödynnetään myös metsäekologian tutkimuksissa. Ekologian tutkimukset jakavat samoja piirteitä metsäinventoinnin kanssa, koska molemmissa puuston perusparametreinä toimivat muun muassa puulaji, puun korkeus, DBH sekä metsän biomassa. Näiden tietojen keräämiseen maalaserkeilaukset keskittyvät niin ekologian kuin metsäinventoinnin tutkimuksissa. (Liang ym., 2016).

Maalaserkeilaimen tuottama aineisto voidaan käydä läpi yksi puu kerrallaan ja mitata manuaalisesti haluttavat parametrit. Kuitenkin TLS:lla tehdyissä puustomittauksissa kiinnostavimmat asiat niin tieteen kuin ekonomian näkökulmasta ovat puustoparametrien ratkaiseminen pistepilvistä käyttämällä automaattisia algoritmeja.

Maalaserkeilauksen hyödyntäminen puustomittauksissa mitataan usein kahdella tavalla: (1) yhdellä keilauksella saadut mittaustulokset (single-scan), jossa keilain asetetaan koealan keskelle ja mitataan kaikki koealan sisällä olevat puut; (2) usealla keilauksella (usein 3-5 keilausta) saadut pistepilvet yhdistetään yhdeksi isoksi pistepilveksi, jolloin saadaan katveisiin jääneet puut entistä paremmin näkyviin. (Maas ym. 2008; Liang ym., 2016; Liang ja Hyyppä, 2013; Lindberg ym., 2012; Olofsson ym., 2014; Murphy ym., 2016). Näin on toimittu useassa tutkimuksessa, jotka esitetään tässä luvussa. Tutkimusten tavoitteena on ollut mitata muun muassa runkojen havaitsevuutta, runkotiheyttä, rungon rinnankorkeuden läpimittaa, puutilavuuden määrää, rungon laatua sekä puunrungon muutoksia.

3.1 Rungon havaitseminen ja runkotiheys

Metsäkoealojen maalaserkeilauksessa keskeisin asia on puun runkojen havaitseminen, jotta niistä voidaan saada halutut parametrit mitattua. Vuonna 2003 Simonse käytti tutkimuksessaan 3D-Hough muunnosta tunnistamaan puut pistepilvestä ja laskemaan rinnankorkeuden läpimitan käyttäen laskettua maanpintamallia hyväkseen. Tätä tutkimusta jatkoivat Aschoff ja Spicker vuonna 2004. He laajensivat algoritmia mittaamaan puun läpimitan jokaiselta korkeudelta. Tämän jälkeen on tehty useita vastaavanlaisia tutkimuksia, joissa tutkittavana kohteena on runkojen havaitseminen TLS-aineistosta. Alla olevassa taulukossa 1 on esitettyä muutaman tutkimuksen tulokset runkojen havaitsemisen suhteen yksittäisellä keilauksella (Single-Scan, SS). Taulukossa on esitettyä tutkimus, tutkimuksessa käytettyjen koealojen lukumäärä, koealan koko metreinä, tiheys sekä havaintomäärä. Tiheys on muutettu

muotoon runkoa/hehtaari, jotta tutkimukset pysyvät vertailukelpoisina. Tulos on havaittujen puiden prosentuaalinen osuus todellisesta puunrunkojen lukumäärästä.

Taulukko 1: Aiempien tutkimusten tulokset: yksittäisten keilausten (single-scan) runkojen havaitseminen. (Liang ym., 2016)

Tutkimus	Koeala			Tulos
	Määrä	koko	Tiheys (runkoa/ha)	Havaintomäärä (%)
Maas ym. (2008)	3	15m säde	212-410	86.7-100
Strahler ym. (2008)	1	50m säde	130	40.2
Murphy ym. (2010)	18	30x33m tai 25x40m	207-570	59
	15	10-20m säde	153-326	82
Lovell ym. (2011)	2	20/50m säde	124/477	54/68
Liang ym. (2012a)	9	10m säde	509-1432	73
Liang ja Hyyppä (2013)	5	10m säde	605-1210	73.4
Olofsson ym. (2014)	16	20m säde	358-1042	73.3

Taulukosta nähdään, että rungon näkyvyyteen vaikuttaa ensisijaisesti metsäkoalan tiheys. Mitä tiheämpi metsä, sen enemmän puut aiheuttavat katvetta, jolloin moni puu jää kokonaan havaitsematta. Toinen vaikuttava tekijä on koealan suuruus, koska mitä suurempi koeala, sitä useampi puu onnistuu muodostamaan näköesteen, jolloin koealan kauimmat puut jäävät todennäköisemmin katveeseen. Harvoissa metsissä, joiden tiheys on alle 400 puunrunkoa hehtaaria kohden, päästään parhaimmillaan 80-100% havaintomäärään, jos koe-alan suuruus ei ole kovin iso (Maas ym., 2008 ja Murphy ym., 2008). Tiheissä metsissä havaintotarkkuus on noin 70% vaikka koealan koko olisi vain 10 metriä (Liang ym., 2012a, Olofsson ym., 2014).

Mittaustulokseen vaikuttavat myös koealan sisällä olevat puulajijakaumat. Erilaiset lehdet ja neulaset läpäisevät lasersäteitä eri tavalla. Maas ym. (2008) tutkimuksessa 2 koealaa sisälsivät 78 ja 66 % kuusipuuta, jolloin mittaustulokseksi saatiin 86,7% ja 100%. Kun kuusipuuta oli vähemmän, olivat havainnotkin parempia. Samalla Murphy ym., (2010) tutkimuksessa keilattiin Maas:in tutkimuksen kanssa samaa tiheyttä ja kokoluokkaa olevaa aluetta, mutta koeala koostuivat mäntypuista. Tällöin tulokseksi saatiin 82%.

Puunrunkojen havaitseminen useammalla keilauksella (Multi-Scan, MS) vaihtelee välillä 62,1-100 % riippuen metsän rakenteesta ja keilaimen asetuksista (Maas ym., 2008). Samanlaisiin tuloksiin päästiin myös Liangin ja Hyyppän (2013) tutkimuksessa, kun tutkittiin puunrunkojen havaintomäärää useammalla keilauksella. Vaikka keilaimen asetuksilla pystytään vaikuttamaan metsämittausten lopputulokseen, on metsän rakenteen havaittu vaikuttavan kaikista eniten puunrunkojen havaintomäärään (Kankare ym., 2015).

3.2 Rinnankorkeuden läpimitan (DBH) mittaaminen

Rinnankorkeuden läpimitta on yksi yleisimmistä mittaussyksiköistä, kun on kyse puustomitauksista. Sitä pidetään tavanomaisesti tärkeimpänä mittaussparametrina metsätieteiden keskuudessa. Siksi sitä onkin tutkittu lähes kaikissa tutkimuksissa, joissa tutkitaan laserkeilain-

ten soveltuvuutta metsämittauksissa. Alla on esitettyä taulukossa 2, kuinka hyvin yksittäisen laserkeilaimen tuottamasta pistepilvestä saadaan laskettua rinnan läpimitta. Taulukkoon on merkittynä tutkimuksen tulokset siten, että on laskettu, kuinka paljon laserkeilausaineistosta mitattu DBH-arvo poikkeaa todellisesta läpimitasta. Tulos on myös ilmoitettu virheiden neliöllisenä keskiarvona (RMSE, Root Mean Square Error).

Taulukko 2: Aiempien tutkimusten tulokset: yksittäisten keilausten DBH-mittaukset (Liang ym., 2016)

Tutkimus	Koeala			Tulos	
	Määrä	koko	Tiheys (runkoa/ha)	DBH virhe (cm)	DBH RMSE (cm)
<i>Maas ym. (2008)</i>	3	15m säde	212–410	-0.7 ... 1.6	1.8 ... 3.3
<i>Brolly ja Kiraly (2009)</i>	1	30m säde	753	-1.6 ... 0.5	3.4 ... 7.0
<i>Liang ja Hyyppä (2013)</i>	5	10m säde	605–1210	-0.2 ... 0.8	0.7 ... 2.4
<i>Olofsson ym. (2014)</i>	16	20m säde	358–1042	0.6	2.0 ... 4.2

Taulukosta nähdään, että rinnankorkeuden läpimittaa laskettaessa laserkeilausaineistosta virhettä tulee pääosin alle puolitoista senttimetriä molempiin suuntiin. Mittaustarkkuuteen ei vaikuta niinkään koealan koko tai tiheys, koska katveeseen jäävät puut jäävät kokonaan mittaamatta eikä ne näin ollen vaikuta virheen suuruuteen. Esimerkiksi Maas ym. (2008) tutkimuksessa kahdessa koealassa päästiin 1,8 cm RMSE tulokseen ja yhdessä 3,3 cm RMSE tulokseen. Kahden ensimmäisen koealan mittaukset suoritettiin Faron vaihe-erokeilaimella ja jälkimmäinen koeala Riegl'in pulssikeilaimella, Tämä johtuu siitä, että tuolloin pulssikeilaimen tarkkuus oli selvästi heikompi kuin vaihe-erokeilaimen tarkkuus. Tutkimuksessa käytetyn vaihe-erokeilaimen etäisyysmittaustarkkuus oli 3mm ja pulssikeilaimen etäisyysmittaustarkkuus 5-7mm. Tämä näyttäisi korreloivan DBH:n RMSE-luvun kanssa.

Useamman keilauksen muodostamasta pistepilvestä mitatut DBH-arvot vaihtelivat Maas ym. (2008) tutkimuksessa 1,5 senttimetriä todellisesta arvosta. Myös Kankare ym. (2015) julkaisussa tutkittiin useamman keilauksen tuottaman pistepilven tarkkuutta DBH-mittauksissa. Tällöin tulokseksi saatiin 1,4...2,0 cm. Liang ja Hyyppä (2013) tutkimuksessa vastavasti mitattiin viisi 20 metrin säteistä koealaa usealla keilauksella, jolloin neliölliseksi keskiarvoksi DBH-tulokselle saatiin 0,9...1,9 cm.

Useammat keilaukset eivät näin ollen lisää rinnankorkeuden läpimitan mittaustarkkuutta, vaikka siten saadaankin useampi puu mitattua. Mittaustarkkuus riippuu pääosin laserkeilaimen ominaisuuksista. Lisäksi tulokseen saattaa vaikuttaa myös useamman keilauksen yhdistämisestä aiheutuvat virheet. Tämä saattaa selittää sen miksi useamman keilauksen tapauksessa rinnankorkeuden läpimitan tulosten virhearvot ovat joissain tutkimuksissa jopa huomontia kuin yksittäisellä keilauksella saadut tulokset. Kuitenkin on huomioitava, että tulokset vaihtelevat keskenään huomattavan paljon ja siksi lisätutkimuksille olisi tässä kohtaa tarvetta (Liang ym., 2016).

3.3 Puun korkeuden arviointi

Puunkorkeuden laskemista TLS aineistosta ei ole tutkittu kovinkaan paljon. Yksi merkittävä syy tähän on latvusten aiheuttamat katveet puunlatvojen näkyvyyteen. TLS-mittauksilla saadaan puunlatvat heikosti näkyviin, koska lasersäteet eivät läpäise kovin tehokkaasti puiden oksia ja lehtiä. Toinen ongelma on tiedon puute puun todellisesta latvasta. Laserkeilausaineistossa puu saattaa näyttää muodon perusteella kokonaiselta, mutta todellisuudessa puun latva olisi ollut vielä korkeammalla. Puiden korkeutta on kuitenkin mitattu TLS-aineistosta erilaisten estimaatioiden avulla, joissa puiden korkeudet pyritään arvioimaan puun rungon avulla. Alla on esitettyä taulukossa 3 tiivistelmä muutamista tutkimuksista, joissa puiden korkeuksia on pyritty arvioimaan TLS-aineistosta. Taulukkoon on merkitty koalatietojen lisäksi keilaustapa (yksittäinen keilaus vai useampi keilaus) sekä tuloksen virhe verrattuna todelliseen puun korkeuteen. Tulos on esitetty myös RMSE muodossa.

Taulukko 3: Aiempien tutkimusten tulokset: puun korkeuden arviointi TLS-aineistosta (Liang ym., 2016)

Tutkimus	Koeala		Aineisto	Tulos	
	Määrä	Tiheys (runkoa/ha)	Mittaustapa	Korkeusvirhe (m)	RMSE (m)
Huang ym. (2011)	1	212	MS	-0.3	0.8
Hopkinson ym. (2004)	2	465, 661	MS	-1.5	
Maas ym. (2008)	4	212–410	MS/SS	-0.6	4.6
Liang ja Hyyppä (2013)	5	605–1210	MS	1.3	2.0 ... 6.5
			SS	0.6	1.4 ... 4.3
Olofsson ym. (2014)	16	358–1042	SS	-0.1	4.9

Puun korkeuden estimoinnin virhe vaihtelee tutkimuksista riippuen välillä -1,5...1,3 metriä. Taulukossa mainitut mittaustavat olivat yksittäiset keilaukset (Single-Scan, SS) sekä usean keilauksen yhdistelmä (Multi-Scan, MS). Kuten taulukosta nähdään, ei mittaustapa tuo lisätarkkuutta puun korkeuden arviointiin. Vaikka MS-mittauksilla saadaan suuremmalla todennäköisyydellä puun latva näkyviin, ei tästä ole hyötyä tapauksissa, joissa puun korkeutta mitataan estimaatioiden avulla. MS-mittausten tuoma hyöty verrattuna SS-mittauksiin on tässä tapauksessa se, että MS-aineistosta saadaan useampi puu mitattua. Mittaustavan lisäksi koealan tiheys ei myöskään vaikuta mitattavan puun korkeusvirheeseen.

Kuten aiemmin mainittiin, on puiden pituuksien mittaaminen suoraan TLS-aineistosta hankalaa, koska puun latvat jäävät usein varjoon puun oksien ja lehtien takia tai muiden puiden ollessa tiellä. Tätä asiaa tutkivat Huang ym. (2011) sekä Fleck ym. (2011) ja molemmissa tutkimuksissa todettiin, että puiden korkeuksien mittaaminen ilman estimointia on haastavaa. Huang ym. (2011) tekemässä tutkimuksessa keilaus tehtiin Riegl:n LMS-360i mallisella pulssikeilaimella. Vaikka pulssikeilaimet läpäisevätkin teoriassa latvukset paremmin kuin vaihe-erokeilaimet, ei läpäisevyys ollut riittävän hyvä puiden korkeuksien mittaamiseen. Kyseisessä tutkimuksessa todettiin automaattisten algoritmien käyttämän estimaation olevan puiden korkeuksien mittaamisessa parempi vaihtoehto kuin se, että puiden korkeus mitattaisiin visuaalisesti TLS-aineistosta.

Puiden korkeuksien mittaaminen TLS-aineistosta vaatii lisätutkimusta erityisesti puun korkeuden visuaalisen mittaamisen suhteen. Tutkimuksissa pitäisi ottaa huomioon se, kuinka

laserkeilaimen mittausrésoluutio vaikuttaa puun latvan náykyvyyteen. Samalla tulisi tutkia, kuinka eri mittaukset vaikuttavat latvan havaitsemiseen. Oletettavasti MS-mittaukset lisáisivát todennákóisyyttá saada latva pistepilveen kokonaisuudessa náykyviin verrattuna SS-mittauksiin. Luotettavalla mittauksella, jossa puun latva saadaan keilausaineistossa táydellisesti náykyviin, voidaan päästá puun korkeuden määriytyksessá jopa senttimetrin mittauksetarkkuuteen.

Támán hetkinen tilanne puun korkeuden määrittämiseen TLS-aineistosta ei ole vielä riittävän tarkka, jotta tekniikan avulla tehtáisiin korkeusmääriytykset metsáinventoinnin yhteydessá. Yksi ratkaisu puun korkeuden mittaamiseen olisi mahdollisesti TLS- ja ALS-aineiston hyódyntáminen samanaikaisesti, jolloin ALS aineistosta saataisiin puun latvat náykyviin. Náin ALS-mittauksilla saadut tulokset voitaisiin yhdistää TLS-aineistoon, jolloin tulokset tulisivat todennákóisesti huomattavasti tarkemmiksi. (Liang ym., 2016).

3.4 Puutilavuuden ja biomassan arviointi

Puutilavuuden määrittámistä TLS-aineiston avulla on tutkinut muun muassa Pueschel ym. vuonna 2013. Tuolloin mitattiin kuuden puunrungon tilavuudet jopa kymmenen metrin korkeuteen. Mittauksetapana käytettiin SS-mittauksten lisáksi MS-mittauksia. SS-mittauksten virheeksi saatiin -34...44%, kun taas vastaavasti MS-mittauksissa virheen suuruudeksi saatiin vain -2...6%. Seuraavana vuonna Astrup ym. (2014) tutkivat samaa asiaa kolmelle puulajille. Tutkittavat puulajit olivat kuusi, mánny ja koivu. Koealat keilattiin vain keskeltá, eli kyseessá oli SS-mittaus. Tutkimuksessá kävi ilmi, ettá TLS:n avulla tehty puutilavuuden määrittáminen poikkesi todellisesta arvosta keskimáárin 68, 15 ja 24 dm³ yhtá kuusen, mánny ja koivun puunrunkoa kohden. Kuusen poikkeavuus oli tássá tutkimuksessá suurin eikä sille osattu antaa suoraa selitystá. Yhtená selityksená pidettiin sitä, ettá kuusi oli tutkimusalueilla keskimáárisesti suurin puu, jolloin lápimitan ja korkeuden estimoinnit heittelevát helpommin. (Pueschel ym., 2013; Astrup ym., 2014).

Liang ym. (2014) tutkivat puutilavuutta mittaamalla runkokáyriá automaattisesti. Tuolloin tulokseksi saatiin yhden puunrungon poikkeavuudeksi -0.9...-12,5 dm³ kuuselle, mánnylle ja koivulle. Tämä arvo muutettiin RMSE-luvuksi, jolloin poikkeavuutta tuli kuutiodesimeetreinä 24,2...34,9 dm³ sekä prosentteina 8,9...9,8 %. Tulos osoitti, ettá maalaserkeilaimella saatu tulos puutilavuuden määrittámiseen oli yhtá hyvä kuin paras kansallisessa käytössá oleva vaihtoehtoinen menetelmä. (Liang ym., 2014b).

Liangin mukaan erityisesti puuvolyymien mittaaminen ei vaadi kovin paljon estimointeja, koska tilavuudet ovat laskettavissa pistepilvestá. Perinteisissá menetelmissá puun tilavuus saadaan tarkasti laskettua kaatamalla puu alas, koska puun korkeutta ei saada kovin tarkasti mitattua olemassa olevilla menetelmillá. Náin ollen perinteinen tilavuuden määrittáminen voidaan olettaa olevan jopa epäluotettavampi kuin TLS-mittauksilla tehty arvio. (Liang ym., 2016).

Biomassan arviointi on puutilavuuden kanssa hyvin samantapainen arviointimenetelmä. Tyypillisesti biomassan arvioimisessa käytetään koealalla olevien puiden rinnankorkeuden lápimitan, puun korkeuden sekä puulajin tietoja hyväksi. Tätá tutki Yu ym. (2013) tutkimuksessáan, jossa pyrittiin määrittámään koealan biomassaa käyttáen hyväksi automaattista algoritmia. Tutkimuksessá mitattiin TLS:lla saadusta pistepilvestá puunrunkojen biomassat, jonka jälkeen tulosta verrattiin maastomittauksten tuloksiin. Tuloksena saatiin RMSE-arvoksi

17,9%. Kun puunrunko rekonstruoidtiin ja mitattiin tämän jälkeen biomassaa, saatiin vastaava RMSE-luku laskettua 12,5 %:iin.

Toisessa tutkimuksessa Kankare ym. 2013 arvioivat koealan biomassaa niin rungolle kuin oksille hyödyntäen TLS-aineistosta saatuja mittareita. Tulokset osoittivat, että erityisesti oksien biomassan arviointi parani huomattavasti verrattuna aikaisemmin olemassa olleisiin biomassan laskentamalleihin. Koealat olivat kuusi ja mäntyvaltaisia. Tutkimuksessa tulokseksi saatiin männylle 12,9% ja kuuselle 11,9%. Samaan johtopäätökseen päätyivät Hauglin ym. (2013) tehdyssä tutkimuksessa. Heidän tutkimuksessaan mitattavat koealat koostuivat pääosin kuusipuista. Hauglinin tutkimuksessa tarkasteltiin myös ALS-aineiston hyödyntämistä TLS-aineiston ohella. Tarkoitus oli täydentää puun korkeudesta saatavaa tietoa ALS-aineiston avulla. Tämä lisäys paransi biomassan arviointia noin kolmella prosentilla.

Tulosten mukaan TLS-mittaukset ovat varteenotettava vaihtoehto arvioitaessa metsien biomassaa. Menetelmän puolesta puhuu erityisesti mittauksen automaatio ja tarkkuus. Biomassan arviointia TLS-aineistosta ei ole aiemmin tutkittu kovin laajasti, joten tutkimuksia asiasta ei ole kovin montaa. Näin ollen lisätutkimuksille olisi tarvetta. Etenkin pulssi- ja vaiheerokeilaimen välisistä eroista biomassan arvioimisessa olisi hyvä tehdä lisätutkimuksia. Näin tiedettäisiin, kumpi keilaintyyppi soveltuisi paremmin tulevaisuudessa tämän kaltaisiin mittaustarkoituksiin.

3.5 Rungon laadun ja muutoksen mittaaminen

Puun laadun arviointi on elintärkeä tieto metsäsuunnittelussa, koska laatu vaikuttaa suoraan puun arvoon ja tuotantokykyyn. Puun laatuun vaikuttavat seuraavat asiat: kuolleiden ja elävien oksien välinen jakauma sekä puunrungossa esiintyvä lahonneisuus, jonka aiheuttajana voi olla esimerkiksi sieni. Kankare ym. 2014 -tutkimuksessa tarkasteltiin TLS:n avulla mitattuja mäntyjä ja mitattiin erilaisia laatutekijöitä. Esimerkiksi alimmaisten elävien oksien korkeuksien RMSE-virheeksi saatiin vain 9,6 % ja kuolleiden oksien vastaavaksi luvuksi saatiin 42,9 %. Lisäksi tutkimuksessa pyrittiin luokittelemaan puut seuraaviin luokkiin: korkealaatuiset puut, tavalliset puut sekä kuitupuut. Tulokset vastasivat kenttämittauksissa saatuja tuloksia 95,0 % ja 83,6 %. Sama toistettiin lisäämällä luokitteluluokkia kolmesta viiteen. Tuolloin mittaustarkkuus pieneni hieman 87,1 ja 76,4 %:iin.

Puiden muutokset metsissä aiheutuvat yleisimmin luonnollisista olosuhteista tai harvennusten jättämistä jäljistä. Nämä muutokset ovat tärkeitä tietoja tilanteissa, joissa metsiä tutkitaan pidemmältä ajanjaksolta. Siinä missä monet tutkimukset ovat keskittyneet erilaisten puusto-parametrien keräämiseen metsien TLS-mittausten yhteydessä, on metsien muutosta tutkittu verrattain vähän. Metsien rakenteellista muutosta on tutkittu Liang ym. (2012b) tekemässä tutkimuksessa, jossa aineisto kerättiin TLS-mittauksilla. Tutkimuksessa seurattiin viittä metsäkoelaa pidemmältä aikaväliltä, jolloin 90 % puunrunkojen lukumäärän muutoksista onnistuttiin havaitsemaan. Havainnot saatiin mitattua automaattisesti ja mittaustapana käytettiin ainoastaan yksittäistä keilausta (Single-Scan, SS).

Srinivasan ym. (2014) tutkivat biomassan muutosta koealoilla, jotka olivat mäntyvaltaisia. TLS-aineistoa kerättiin kolmen vuoden välein käyttäen mittaustapana SS-mittauksia. Biomassa laskettiin DBH-arvon perusteella käyttäen kansallisia laskentamenetelmiä. Biomassan muutoksen RMSE-virhearvoksi saatiin 10,1...13,0kg. Toisessa tutkimuksessa Men-

gesha ym. (2015) tutkittiin puutilavuuden kasvua kahden vuoden ajanjaksolta käyttäen hyväksi TLS-aineiston lisäksi perinteisiä mittauksia. TLS-mittausten tulokset poikkesivat keskimäärin 6,0% ($4,8\text{m}^3/\text{ha}$) perinteisiin mittaustuloksiin nähden, kun koeaineistoon otettiin mukaan ainoastaan puut, jotka keilain pystyi havaitsemaan. Nämä tulokset osoittavat, sen että TLS-laitteisto mahdollista myös muutosten havaitsemisen melko hyvällä tarkkuudella.

4 Pulssi- ja vaihe-erokeilaimien vertailu puustomittauksissa Evon koealoilla

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen toteutus. Luvussa 4.1 käydään tarkemmin läpi, mistä tutkittavaa aineistoa kerättiin ja miten mittaukset käytännössä toteutettiin. Luvussa 4.2 perehdytään kerätyn aineiston esikäsittelyyn ja siihen liittyviin eri vaiheisiin. Luvussa 4.3 käydään läpi, kuinka puustomittaukset toteutettiin kerätylle aineistolle.

4.1 Aineiston keruu

Tutkimusaineistoa kerättiin Hämeenlinnan läheisyydessä olevasta Evo nimisestä kylästä, jonka välittömässä läheisyydessä sijaitsee useita metsäkoaloja. Alue kuuluu pääosin Evon metsäopistolle, joten metsät ovat tarkoitettu pääosin tutkimuskäyttöön ja siksi siellä on toteutettu useita metsään liittyviä tutkimuksia. Alue sijaitsee Kanta-Hämeen maakunnassa. Alueen sijainti Suomessa on merkitty alla olevaan kuvaan 7. Evo sijoittuu noin 61,19° leveyspiirin ja 25,11° korkeuspiirin tienoille. Alue kuuluu kasvillisuudeltaan eteläiseen boreaaliseen vyöhykkeeseen eli pohjoisen havumetsävyöhykkeen eteläisempään osaan.



Kuva 7: Koealan sijainnit Suomessa (Muokattu lähteestä Paikkatietoikkuna.fi).

Aineistoa kerättiin 24 koealasta, jotka ovat mukana kansainvälisessä metsien TLS-kartoituksen vertailututkimuksessa (European Spatial Data Research, EuroSDR). Kyseisille koealoille aloitettiin vuonna 2014 kampanja, jonka tarkoituksena oli verrata erilaisia 3D kaukokartoitustekniikoita metsätaloudessa. Koealoja on kartoitettu käyttäen mm. seuraavia mitausmenetelmiä: ilmakehävasta, ilmalaserkeilausta, tutka- ja optisen alueen satelliitteja, maalaserkeilausta, liikkuvaa laserkeilausta, UAV kuvausta sekä UAV-keilausta. Mittaukset on toteutettu Helsingin yliopiston, Aalto yliopiston ja Geodeettisen laitoksen, sittemmin Paikkatietokeskuksen, yhteistyönä. (Kaartinen, 2014).

4.1.1 Maastokoealat

Tätä tutkimusta varten valittiin 24:stä EuroSDR-koealoista kuusi koealaa, jotka prosessoitiin tarkemmin. EuroSDR-koealat jaettiin kolmeen kategoriaan: helppo, keskitaso ja vaikea. Kuusi koealaa valittiin ottamalla kaksi helppoa, kaksi keskitasoa ja kaksi vaikeaa koealaa, jotta nähdään eri mittausolosuhteiden vaikutus mittaustuloksiin. Koealan vaikeusaste määrytyi sen perusteella, kuinka hankala aluetta oli mitata TLS:n avulla. Tähän vaikuttivat muun muassa koealan maanpinnan muodot sekä koealan tiheys.



Kuva 8: Tutkimukseen valitun kuuden koealan sijainnit kartalla. Numerointi vastaa EuroSDR-numerointia (Muokattu lähteestä Paikkatietoikkuna.fi).

Yllä olevassa kuvassa 8 on esitettynä koalojen tarkemmat sijainnit punaisella. Koealojen numerotunnukset vastaavat EuroSDR-tunnuksia. Koealan sijoittelussa pyrittiin valitsemaan alueita mahdollisimman monipuolisesti niin puulajien, maasto-olosuhteiden, metsän iän kuin koealatiheyden kannalta. Koealojen monipuolisuuden varmistamiseksi alueen valinnassa oli mukana Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos. He olivat vahvasti mukana myös muissakin EuroSDR-projektin mittauksissa.

Koealojen puustotietoja on kuvattu alla olevassa taulukossa 4, johon on merkitty jokaisen puulajin prosentuaalinen osuus koe-alan kaikista puulajeista. Taulukon lukuarvot on laskettu käyttämällä vuonna 2014 kerättyä aineistoa. Tuolloin koealan puut mitattiin perinteisin mittauksin yksi puu kerrallaan. Mittauksissa otettiin huomioon vain halkaisijaltaan yli viisi senttimetriset puut, joiden DBH-arvo, korkeus sekä puulaji kirjattiin ylös.

Taulukko 4: Tutkimukseen valitut koealat, niiden vaikeustaso sekä suhteelliset puulajiosuudet.

Koeala			Puujakauma				2014 tulokset	
Tunnus	koko (m)	Vaikeustaso	Mäntyjä %	Kuusia %	Koivua %	Pääpuulaji	Puiden lkm	Puiden keskikorkeus H (cm)
1002	32x32	helppo	98,17 %	1,29 %	0,53 %	Mänty	50	18.7 +/- 4
1016	32x32	vaikea	88,91 %	5,30 %	4,53 %	Mänty	148	15.5 +/- 6.8
1034	32x32	keskitaso	54,47 %	21,63 %	3,92 %	Mänty	131	13.5 +/- 3
1045	32x32	vaikea	30,45 %	62,65 %	6,64 %	Kuusi	64	19.7 +/- 8.4
1048	32x32	helppo	76,05 %	3,82 %	16,00 %	Mänty	44	19.8 +/- 6.3
1052	32x32	keskitaso	0,11 %	34,80 %	14,71 %	Sekametsä	229	11.9 +/- 6.6

Vuonna 2014 saaduista lukuarvoista laskettiin yllä olevaan taulukkoon yksittäisen koealan puujakaumat, mitattujen puiden lukumäärä sekä puiden keskikorkeudet. Tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia tämän tutkimuksen tulosten kanssa, koska taulukon lukuarvot on laskettu vuonna 2014. Tuon jälkeen koealassa 1002 on suoritettu harvennushakkuu. Lisäksi koealan puut ovat kasvaneet jonkin verran kahdessa vuodessa. Samalla osa puista on saattanut kaatua. Siksi vuoden 2014 aineistoa ei voida pitää absoluuttisena tarkkuutena verrattaessa sitä tämän tutkimuksen tuloksiin. Näin ollen taulukon 4 tuloksia tarkastellaan tässä tutkimuksessa vain suuntaa antavana aineistona.

Lähes kaikki koealat ovat joko kuusi- tai mäntyvaltaisia, kuten taulukosta 4 nähdään. Kaikista kuvatuista 24 EuroSDR-koealoista lähes kaikki olivat joko kuusi- tai mäntymetsää. Ainoastaan yksi koeala oli täysin koivupuiden peitossa. Kyseistä koealaa ei valittu tähän tutkimukseen siksi, koska yksittäistä koivuvältaista koealaa ei olisi voitu verrata tilanteisiin, joissa mittausolosuhteet olisivat olleet helppoja, keskivaikeita tai vaikeita.

4.1.2 Mittausvälineet

Koko tutkimuksen tarkoituksena oli verrata pulssikeilaimen ja vaihe-erokeilaimen välisiä eroja puustomittauksissa. Jotta tutkimuksen tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailukelpoisia, tuli molempien keilainten ominaisuuksien vastata toisiaan mahdollisimman hyvin. Tutkimukseen otettiin käyttöön seuraavat keilaimet, jotka ovat molemmat Paikkatietokeskus FGI:n omistamia: (1) pulssimittausta hyödyntävä Leican ScanStation P40 –laserkeilain ja (2) vaihe-eromittausta hyödyntävä Trimblen TX5.

Leican valmistama ScanStation P40 on Leican tämän hetken uusin laserkeilainmalli. Keilain hyödyntää mittauksessaan pulssitekniikkaa, jonka lasersäteen aallonpituudet ovat joko 1550nm (näkyvätöntä valoa) tai 658nm (näkyvää valoa). Keilaimen mittaustarkkuus on pulssikeilaimeksi erittäin hyvä, koska pulssikeilaimet ovat perinteisesti olleet tarkkuudeltaan huonompia kuin vaihe-erokeilaimet. Tarkkuus ilmoitetaan millimetreinä kymmenen metrin etäisyydellä. P40 kykenee parhaimmillaan 0,8 millimetrin tarkkuuteen 10 metrin etäisyydellä. Keilain pystyy mittaamaan jopa miljoona pistettä sekunnissa. Kuva Leican keilaimesta löytyy kuvasta 9 vasemmalta. (Leica ScanStation P30/P40, 2015a).

Toimintaetäisyys on Speed -toiminnolla 120 metriin asti, mutta sitä pystyy lisäämään Range -toiminnolla, jolloin keilaimen toimintaetäisyys kasvaa 270 metriin. Toisaalta Range -toiminto hidastaa laitteen keilausaikaa tarkemmissa mittauksissa noin kaksinkertaisesti. Esimerkiksi pisteresoluutiolla 6,3 mm kymmenessä metrissä kestää molemmissa toiminnoissa yhtä kauan, kun taas 0,8 mm/10m vie Speed-toiminnolta noin 54 minuuttia ja Range toiminnolta tunnin enemmän. P40:n keilausala on horisontaalisessa suunnassa 360° ja vertikaalisuunnassa 270°. Keilain sisältää myös sisään rakennetun kameran, jolla saadaan otettua myös HDR-kuvia. (Leica ScanStation P30/P40, 2015b).



Kuva 9: Vasemmalla Leican pulssikeilain ScanStation P40 ja oikealla Trimblen vaihe-erokeilain TX5 (Leica ScanStation P30/P40, 2015b ja Trimble TX5, 2012).

Trimblen valmistama TX5 on vastaavasti vaihe-eromittaukseen perustuva laserkeilain, jonka lähettämien laserpulssien aallonpituus on 905nm (näkymätöntä valoa). Keilain kykenee mittaamaan kohteet jopa 0,6mm tarkkuudella kymmenen metrin etäisyydessä. Vaikka TX5 on hieman tarkempi kuin P40, ei pulssi- ja vaihe-erokeilainten välinen ero ole erityisen merkittävä. Mittauksia keilain pystyy suorittamaan parhaimmillaan lähes miljoona pistettä sekunnissa. Tarkka luku on 976 000 pistettä/s. Trimblen ulkonäkö ja suuntaa antava kokoero Leican keilaimen nähden löytyy yllä olevasta kuvasta 9, jossa Trimblen keilain sijaitsee oikealla puolella. (Trimble TX5 Scanner, 2012).

Pisin mahdollinen mittausetäisyys rajoittuu TX5:ssä 120 metriin. Keilausalue on P40:n tapaan horisontaalisesti 360°, mutta vertikaalisessa suunnassa TX5 pystyy keilaamaan 300°. Vaikka keilausala onkin 30 astetta suurempi kuin pulssikeilaimella, ei sillä ole tässä tutkimuksessa suurta merkitystä, koska katveeseen jäävä sektori osoittaa suoraan alaspäin. Näissä mittauksissa keilaimen alle jäävä alue on merkityksetön. TX5-keilaimessa on myös sisään rakennettuna kamera, jolla voi ottaa keilauksen jälkeen ympäristöstä kuvia laserpisteiden väriarvojen laskentaa varten. (Trimble TX5, 2012).

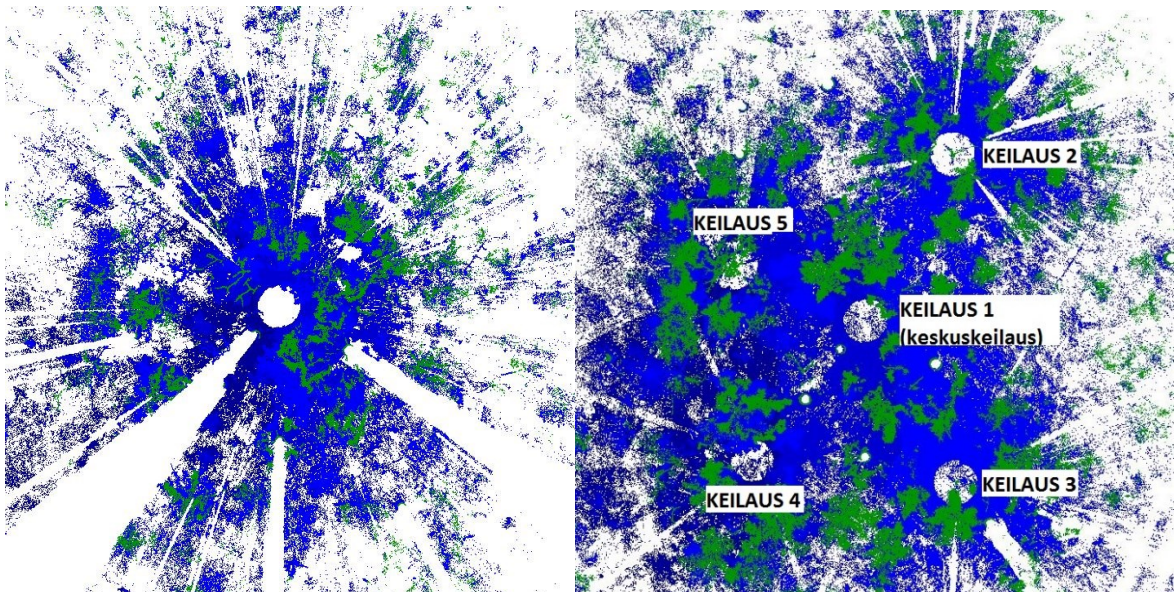
Trimblen TX5-keilaimella skannattiin ¼ resoluutiolla, joka vastaa 6.136 mm/10m. Tällöin keilaukseen kului aikaa 8 min 9 s. Tästä ajasta suunnilleen puolet meni pistepilviaineiston keräämiseen, jolloin loppuaika kului kuvien ottamiseen. Vastaavasti Leican ScanStation P40 keilaimen mittausrésoluutioksi asetettiin 6,3 mm/10m. Yhteen mittaussessioon kului Leicalta noin 13 minuuttia aikaa, josta alle 2 minuuttia meni itse keilaamiseen ja loput ajasta

kului valokuvien ottamiseen. Näin pyrittiin saamaan molempien keilainten mittausasetukset vastaamaan mahdollisimman hyvin toisiaan.

4.1.3 Mittausasetelma

Tutkimuksen tarkoituksena oli verrata pulssikeilaimen ja vaihe-erokeilaimen välisiä eroja puuston läpäisevyydessä. Tarkoitus oli verrata keilainten erot kahdessa mittausasetelmassa. Ensimmäisessä mittausasetelmassa keilaimet laitettiin suorittamaan mittaukset koalan keskeltä. Keilainten välissä käytettiin samaa paikalla ollutta kolmijalkaa, jotta mittauspaikat olisivat mahdollisimman samanlaiset. Tämän mittausasetelman tarkoituksena oli verrata molempien keilainten tuloksien eroja yksittäisen keilauksen tapauksessa. Kirjallisuudessa mitaustapaa kutsutaan termillä Single-Scan.

Toinen mitaustapa, jossa keilainten eroja mitattiin, oli useamman keilauksen yhdistäminen. Tätä mitaustapaa kutsutaan kirjallisuudessa Multi-Scan asetelmaksi. Tarkoituksena oli jatkaa Single-Scan mitausta siten, että keskeltä keilattu keilaus toimii muiden keilausten referenssikoordinaatistona. Muut keilaukset asetettiin näin ollen koalan keskeltä katsottuna väli-ilmansuuntiin noin 12-13 metrin päähän. Tällä asetelmalla pyrittiin saamaan mahdollisimman moni koalan sisällä olevista puista näkyviin. Alla olevassa kuvassa 10 on esitettynä mittausasetelma SS-tapauksessa ja MS-tapauksessa. Kuten kuvasta nähdään, ei käytännössä mittausasetelma toteudu täydellisesti. Esimerkiksi keilaus numero 2 on hieman kauempana ja eri suunnassa kuin sen pitäisi olla, koska maasto-olosuhteet eivät ole sallineet parempaa sijoituspaikkaa keilaukselle. Tässä tilanteessa kyseisen keilauspaikan läheisyydessä on jyrkkä alamäki, jonka takia keilaimen sijoittelua on jouduttu siirtämään.



Kuva 10: Ylhäältä otettu leikkauskuva koalan 1034 pistepilvestä. Vasemmalla kuvan keskellä yksittäisen keilauksen keilauspaikka. Oikealla useamman keilauksen (MS) keilauspaikat. Keilainten mittauspaikat ovat ympyröiden keskipisteissä.

Jotta MS-tapauksen keilausaineisto olisi mahdollista rekisteröidä yhdeksi suureksi pistepilveksi, täytyi koalassa käyttää tähyksiä. Tähysten avulla saadaan laskettua jokaiselle pistepilvelle XYZ-paikka suhteessa referenssipisteeseen. Näin ollen jokaisesta keilauksesta täytyi erottua vähintään kolme tähyistä, jotta ne voitiin liittää keskuskeilaukseen. Mittausolo-

suhteiden takia tähyksenä käytettiin kuusi kappaletta ATS:n valmistamia valkoisia tähyspalloja, joiden halkaisijat olivat 19,88cm. Tähyspallot asetettiin puissa oleviin valmiisiin metallilevyihin, joihin tähyspallot saatiin kiinnitettyä magneetin avulla.

Metallilevyt kiinnitettiin puihin jo vuonna 2014 osana EuroSDR-mittauksia. Tuolloin pallojen paikat asetettiin siten, että ne jakautuisivat tasaisin välein keskuskeilauksesta katsottuna. Kuitenkin riittävän kauas keskuskeilauksesta, jotta pallot näkyisivät myös muihin keilauspaikkoihin. Näin ollen tähysten asettamiseksi vakiintui käytäntö, jonka mukaan keskuskeilauksesta katsottuna pohjoisessa olevaan puuhun asetettiin ensimmäinen pallo ja sen jälkeen loput pallot asetettiin noin 60 asteen välien keskuskeilauksesta katsottuna. Vuonna 2014 mitattiin jokaiselle tähykselle koordinaatit. Näitä samoja koordinaatteja käytettiin myös tässä tutkimuksessa aineiston esikäsittelyssä.

Alla olevasta kuvasta 11 nähdään kuinka tähyspallot on asetettuna maastoon. Kuvan neljä valkoista palloa olivat mittaushetkellä käytettyjä tähyksiä. Kuvaruudun ulkopuolelle jäivät loput kaksi palloa, jotka sijaitsivat kuvanottohetkellä kuvaruudun vasemmalla puolella. Kuvassa vasemmalla oleva keilain on Trimblen vaihe-erokeilain, joka sijaitsi kuvanottohetkellä keskellä koealaa. Oikealla on Leican pulssikeilain, joka sijaitsi keilauspaikalla 2.



Kuva 11: Kuva maastomittauksista. Vasemmalla Trimblen keilain ja oikealla Leican keilain toiminnassa. Kuvassa on näkyvillä neljä valkoista tähyspalloa kuudesta.

4.2 Aineiston esikäsittely

Maastomittausten jälkeen aineistot siirrettiin keilaimista tietokoneelle aineiston esikäsittelyä varten. Tätä varten käytössä oli valmistajien omat kehittämät sovellukset, jotka soveltuivat parhaiten juuri keilainten tuottamaan dataformaattiin. Koska Trimblen TX5 keilain pohjautuu Faron valmistamaan X-sarjan keilaimiin, on Trimblen tuottaman aineiston formaatti muotoa FLS. Tästä syystä käytössä oli Faron kehittämä Scene ohjelma, jolla TX5:n aineisto

saatiin esikäsiteltyä. Vastaavasti Leican pistepilvet saatiin käsiteltyä Leican kehittämällä Cyclone nimisellä ohjelmalla.

Trimblen aineiston esikäsitelyssä jokaisen yksittäisen koealan pistepilvet avattiin Scene-ohjelmassa yksittäisenä projektina, jonka jälkeen keskuskeilaus asetettiin referenssikeilaukseksi. Seuraavaksi asetettiin Scene etsimään automaattisesti halkaisijaltaan 19,88 cm pallotähyksiä yksittäisestä pistepilvestä. Löytymättä jääneet pallot etsittiin manuaalisesti, jonka jälkeen ohjelma sovitti pallon oikeaan kohtaan. Lisäksi projektiin lisättiin vuonna 2014 mitatut pallojen koordinaatit taulukkumuodossa. Näin pistepilvet saatiin samalla kertaa rekisteröityä yhteen ja georeferoitua karttakoordinaatistoon. Georeferoinnin ansiosta pistepilvet saatiin rajattua sisältämään vain koealan sisällä olevat pisteet. Koealan ulkopuoliset pisteet poistettiin pistepilvestä kokonaan. Lopuksi pistepilvestä kirjoitettiin PTS-muodossa oleva tiedosto ulos niin keskuskeilauksen kuin yhdistettyjen keilausten suhteen viimeistä vaihetta varten.

Leican aineiston esikäsitely kulki pääpiirteittäin samalla periaatteella kuin Trimblen aineisto. Pistepilvet avattiin Cyclone-ohjelmassa, joka ei kuitenkaan Scenen tavoin pysty automaattisesti palloja erottamaan. Niinpä pallot täytyi manuaalisesti etsiä jokaisesta pistepilvestä erikseen ja merkata niiden halkaisija. Lopuksi lisättiin pallojen koordinaatit, jonka jälkeen muodostettiin edellisen ohjelman tapaan pistepilvistä PTS-tiedostot.

Aineisto oli tarkoitus saada LAS-formaattiin, jotta Xinlian Liangin algoritmi pystyisi käymään pistepilviaineiston automaattisesti läpi mitaten samalla puiden korkeudet ja läpimitat. Algoritmi ei tuolloin osannut lukea muita formaatteja kuin LAS-formaattia. Myös manuaalimittauksissa LAS-formaattista oli hyötyä, koska se oli kevyempi tiedostomuoto verrattuna PTS-formaattiin. PTS-tiedostojen muuntaminen LAS-muotoon toteutettiin Martin Isenburgin kehittämällä avoimen lähdekoodin työkalulla nimeltä Pointzip.

Alla olevassa taulukossa 5 on esitettyä molempien keilainten esikäsitelyn jälkeiset keskivirheet. Virheet ovat olleet pääosin alle senttimetrin luokkaa. Virhearvot on otettu ylös taulukkoon rekisteröinnin jälkeen ennen georeferointia ja georeferoinnin jälkeen. Virheet ovat syntyneet pääosin useamman keilauksen rekisteröinnistä, koska pallojen sijainnit keilaimen koordinaatistossa saattavat poiketa joitain millimetrejä. Georeferointi luonnollisesti nosti keskivirhettä hieman korkeammaksi, koska myös GNSS-mittauksissa syntyy virhettä. Siitä huolimatta virhearvot ovat olleet riittävän tarkat jatkomittauksia varten.

Taulukko 5: Pistepilvien virhearvot eri keilaimilla.

Koeala		Leican keskivirhe (m)		Trimblen keskivirhe (m)	
Tunnus	Vaikeustaso	Ennen georef.	Georef. jälkeen	Ennen georef.	Georef. jälkeen
1002	helppo	0,002	0,004	0,003	0,011
1016	vaikea	0,002	0,005	0,003	0,005
1034	keskitaso	0,001	0,003	0,004	0,011
1045	vaikea	0,002	0,003	0,003	0,005
1048	helppo	0,002	0,002	0,003	0,005
1052	keskitaso	0,002	0,003	0,006	0,008

4.3 Puustomittaukset

Aineiston ollessa koossa ja esikäsiteltynä, alkoi itse aineiston käsittely ja puiden mittaaminen. Tarkoituksena oli tutkia pulssikeilaimen ja vaihe-erokeilaimen välisiä eroja erityisesti läpäisevyyden suhteen. Läpäisevyyden erot pyrittiin ratkaisemaan mittaamalla jokaisen koealan kaikki kokonaiset puut, jotka erottuivat pistepilvestä. Maalaserkeilauksen ongelmana on usein se, että puiden latvoja ei saada kovin tehokkaasti näkyviin. Suurin syy tälle on puiden oksat ja lehdet, joiden läpi laserpulssit eivät pääse. Jos mittausvälineenä käytetään kahdella eri tekniikalla toimivaa laitetta ja toisella laitteella saadaan samoilla mittausolosuhteilla useampi puu näkyviin, tarkoittaa se sitä, että toisen laitteiston mittaustekniikka on läpäisevyydeltä parempi puustomittauksissa.

Toinen tapa erottaa toimintaperiaatteiden läpäisevyys toisistaan oli mitata puunrunkojen läpimitta korkeimmasta kohtaa, jonka pistepilvestä pystyy visuaalisesti mittaamaan. Mitä korkeammalta puunrunkoa voitiin pistepilvestä mitata, sen enemmän on mittaushavaintoja saatu oksien ja lehtien läpi puunrungosta. Tämä johtaa siihen, että läpäisevyyden erot pystytään vertailemaan sen mukaan, kummalla tekniikalla puunrunkoa saadaan korkeammalle näkyviin.

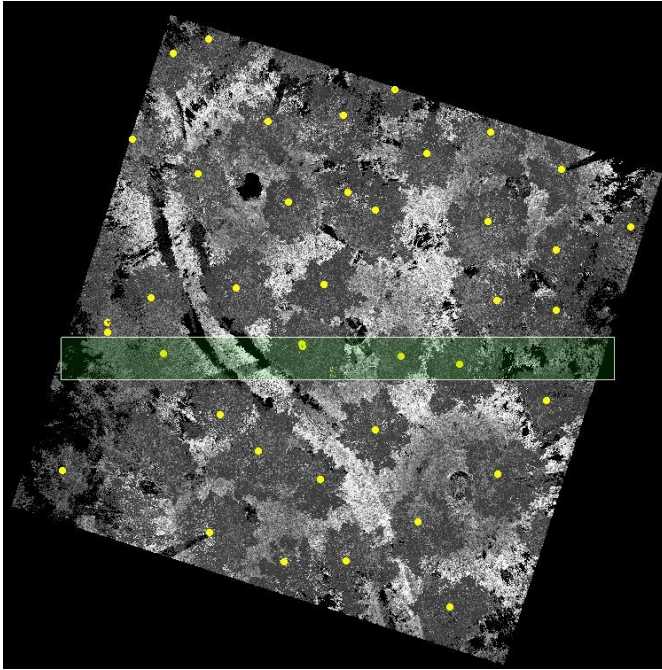
Laserkeilainten välinen läpäisevyys tutkittiin pääsääntöisesti edellä mainituilla tavoilla. Kyseiset mittaustavat koskivat vain manuaalimittauksia. Automaatiomittauksissa puiden korkeudet estimoitiin, jolloin tulos ei viittaa puiden latvojen näkyvyyteen. Toisaalta automaatiomittaukset arvioivat puiden korkeudet sen mukaan, kuinka puunrunko on mitattavissa. Tämä johtaa taas siihen, että mitä useampi puunrunko on ollut mitattavissa, sitä parempi on ollut keilaimen läpäisevyys. Lisäksi algoritmi antaa tuloksen runkokäyrän korkeimmasta kohtaa, jolloin voidaan verrata, kummalla keilaimella runkoa on saatu enemmän näkyviin. Koska manuaali- ja automaatiomittauksen tulokset eivät anna tulosta samoille asioille, ei niitä voida verrata keskenään. Siksi tässä tutkimuksessa ei perehdytä automaatiomittauksen ja manuaalimittauksen välisiin eroihin.

4.3.1 Manuaalimittaukset

Manuaalimittaukset päätettiin suorittaa TerraScan -nimisellä ohjelmalla MicroStation -ympäristössä. Ohjelmaksi valikoitui TerraScan sen monipuolisten ominaisuuksien ja helppokäyttöisen käyttöliittymän takia. Ohjelma tukee PTS-formaattia, mutta kokemuksen mukaan LAS-formaatin toiminta oli nopeampaa ja helpompaa.

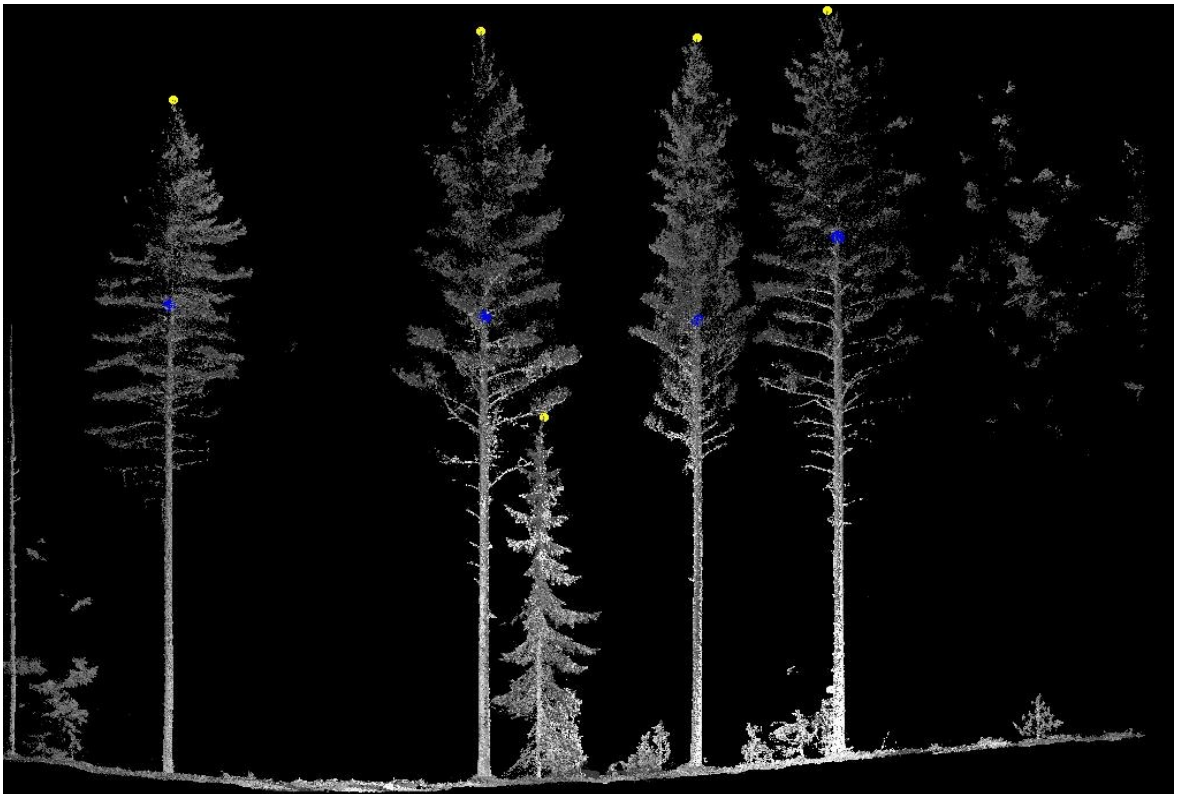
Mittausaineistot käsiteltiin jokaisen koealan suhteen neljä kertaa: koealan keskuskeilaus pulssikeilaimella, yhdistetyt keilaukset pulssikeilaimella, keskuskeilaus vaihe-erokeilaimella ja yhdistetyt keilaukset vaihe-erokeilaimella. Yhden aineiston käsittely oli kaksivaiheinen. Ensimmäisessä vaiheessa mitattiin kaikki kokonaan näkyvät puut ja toisessa vaiheessa mitattiin korkein kohta, josta rungon läpimitta oli mitattavissa.

Mittaus toteutettiin siten, että koealat jaettiin ylhäältä katsottuna useaan riittävän kapeaan osaan, jonka jälkeen tarkasteltiin yhtä osaa kerrallaan. Osaa tarkasteltaessa näkymä käännettiin sivuprofiiliin, jossa kyseisen osan puut asettuvat riviin vierekkäin. Koska jaottelu tehdään riittävän pienille osille, vältytään tilanteesta, jossa puut saattaisivat olla peräkkäin, jolloin taempi puu jäisi etummaisesta puusta taakse piiloon. Tällöin puu jäisi mittaamatta.



Kuva 12: Trimble TX5 keilaimella mitatun koealan 1002 pistepilvi ylhäältä päin tarkasteltuna. Keltaisella on merkitty kokonaisten puiden latvat.

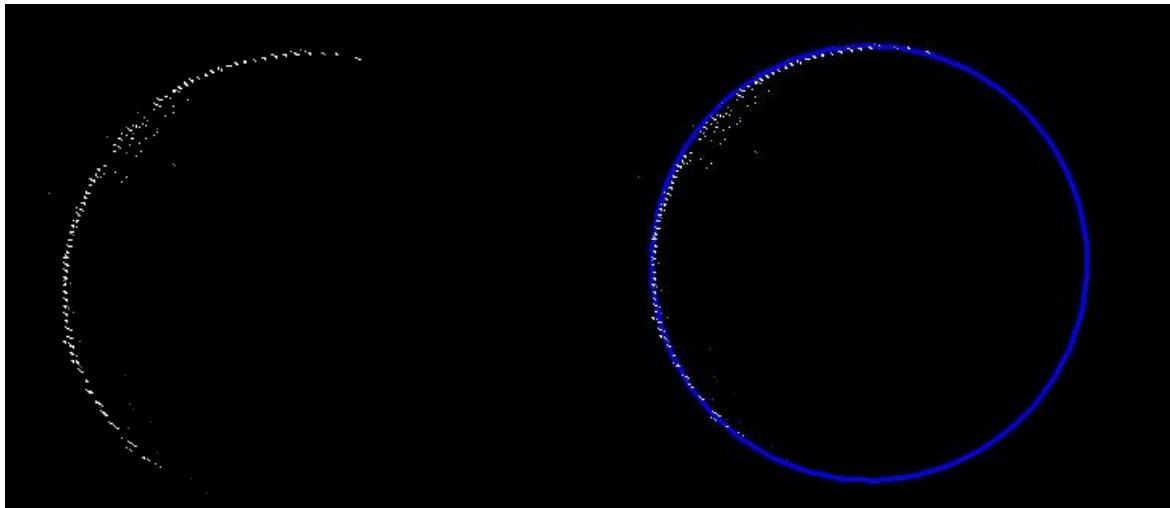
Yllä olevassa kuvassa 12 on havainnollistettu koealan jaottelut ylhäältä päin. Tässä tapauksessa koeala numero 1002 on väritetty korkeuksien mukaan. Keltaiset pisteet ovat puunlatvoja. Rajattu alue vastaa yhtä tarkasteluosaa, joka on leikattuna ja käännettynä sivuprofiiliin alla olevan kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13: Edellisen kuvan 12 aidatun alueen sivunäkymä. Keltaisella merkitty kokonaisten puiden latvat ja sinisellä korkein mitattavissa oleva läpimitta.

Kuvista 13 näkyy, kuinka rajatun alueen keltaisella merkityt latvat vastaavat sivuprofilissa olevia yksittäisiä kokonaisia puita. Seuraavaksi sivuprofilista voidaan mitata kaikki puut, jotka näyttävät visuaalisesti kokonaisilta. Puun muodosta pystyy päättämään onko puun latva kokonaan näkyvissä vai ei. Kuvan 13 tapauksessa kaikki puut näyttivät olevan kokonaisia. Puut, joiden DBH luku oli alle 5 senttimetriä, jätettiin mittaamatta. Jos jokin puu näytti siltä, että se olisi liian pieni, mitattiin etäisyystyökalulla maanpinnasta 1,3 metrin etäisyys puunrunkoon. Tämän jälkeen otettiin puun rungosta viiden senttimetrin leikkaus ja saadusta pistepilven osasta mitattiin puun läpimitta.

Kun kaikki kokonaiset puut on saatu mitattua, päästiin seuraavaan vaiheeseen, jossa samojen puiden läpimitta mitattiin korkeimmasta kohtaa. Läpimitat mitattiin ottamalla viiden senttimetrin leikkaus korkeimmasta kohtaa, josta runko on erotettavissa. Leikkausta tarkasteltiin ylhäältä päin. Pistepilvi muodosti tällöin joko täydellisen ympyrän tai osittaisen ympyrän. Tähän sovitetaan piirtotyökalulla ympyrä, jonka koordinaatit otettiin ylös. Alla olevassa kuvassa 14 on esitettyä rungon leikkauksesta ylhäältä katsottuna. Pistepilven muodostamaan kuvaan voitiin näin ollen mallintaa rungon todellinen muoto. Tällä tavalla pystytään arvioimaan yllättävän tarkasti rungon läpimitta halutulta korkeudelta.



Kuva 14: Puun läpimitan mittaus. Vasemmalla ylhäältä päin katsottuna puunrungon leikkaus. Oikealla pistepilveen sovitettu ympyrä.

4.3.2 Automaatiomittaukset

Tutkimuskysymyksiin pyrittiin löytämään vastaukset myös tilanteissa, joissa puut tunnistetaan automaattisesti pistepilvestä. Tämä osio tehtiin yhteistyössä Xinlian Liangin kanssa. Liangin käyttöön annettiin valmiiksi esikäsitelty aineisto LAS-muodossa, jonka jälkeen hän kävi algoritmillaan jokaisen pistepilvitiedoston erikseen läpi. Algoritmin tulokset on kootuna taulukkomuodossa, jotka esitetään tiivistettynä luvussa 5.2.

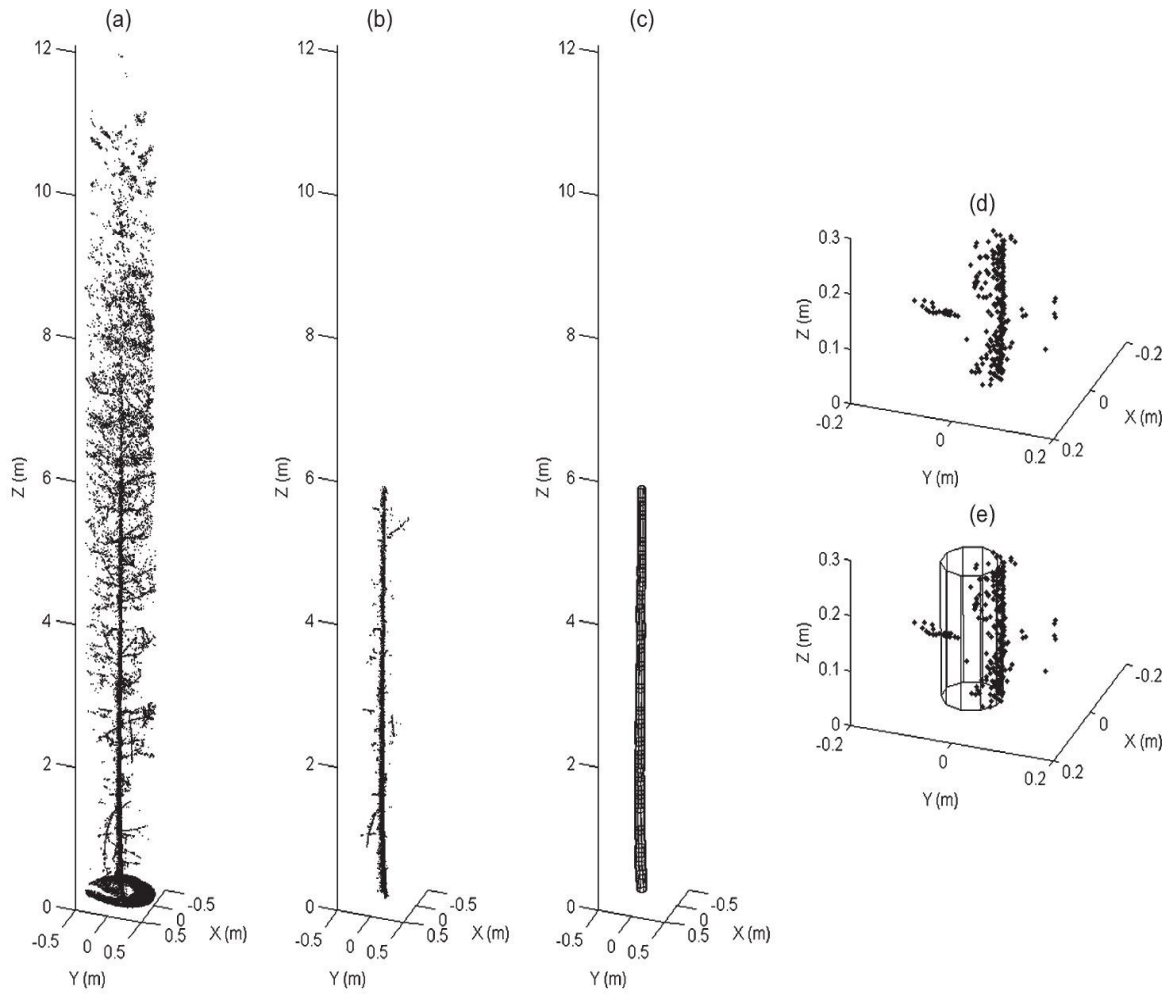
Algoritmin perustoimintamallina on ensiksi identifioida koealalla olevat puunrungot, jonka jälkeen algoritmi lähtee rakentamaan runkomallia jokaiselle tunnistetulle rungolle. Algoritmi määrittää automaattisesti spatiaalisen jakauman jokaiselle pisteelle analysoimalla pisteen ympärillä olevien naapuripisteiden jakaumaa. Naapurialueen koko toisaalta määräytyi paikallisen alueen pistetiheyden mukaan. Mitä tiheämpi alue, sen pienempi on naapurialueen koko ja päinvastoin. Tämä toimintaperiaate on valittu algoritmiin siksi, koska tavanomaisesti

alueet, joissa pistetiheys on matala, itse kohteesta on saatu vain vähän pistedataa. Tällöin kohteen ominaisuudet ovat vaikeasti havaittavissa. Tästä syystä suurempi naapurisuusalue on välttämätön pistetiheyden ollessa pieni, jotta saadaan tarpeeksi naapuruspisteitä ilmentämään kohteen ominaisuudet. Vastaavasti pistetiheyden ollessa korkea toimitaan päinvastoin. (Liang ym., 2015)

Puunrunkojen löydyttyä lähialueen pisteet asetetaan paikalliseen koordinaatistoon, siten, että kaikki naapuripisteet ovat samassa koordinaatistossa keskenään. Samalla määritetään akselien suunnat ominaisvektoreiden avulla. Myös akselien kautta kulkeville pisteille annetaan ominaisarvo. (Liang ym., 2015)

Lopuksi algoritmi muodostaa puunrunkomallin kaikista mahdollisista runkopisteistä. Tällöin tarkoituksena on asettaa perättäisenä sarjana 3D-muotoisia sylintereitä, jolloin saadaan rungon muotojen vaihtelut näkyviin. Seurattavia muutoksia näissä 3D-sylintereissä ovat muun muassa rungon kasvusuunta sekä läpimitta. Tämän mallin ja muutosparametrien avulla voidaan olemassa olevan rungon jatkeeksi mallintaa lopullinen puunrunko. Arvioitavan rungon osuus vaihtelee sitä mukaan, kuinka paljon puunrunkoa on näkyvissä pistepilviaineistosta. (Liang ym., 2015; Liang ym. 2012a).

Alla olevassa kuvassa 15 on esitettyinä algoritmin eri vaiheet. A-kohdassa on esitettyinä puu, josta algoritmi tulee tekemään runkokäyrän. B-kohdassa on luokiteltuna rungon kaikki naapuripisteet. Runko jaetaan useampaan osaan, jolloin jokaiselle osalle asetetaan oma sylinteri (e- ja d-kohdat). Nämä sylinterien osat muodostavat yhdessä c-kohdassa esitetyn sylinterimäisen runkomallin. Tästä runkomallista algoritmi pyrkii laskemaan puun todellisen korkeuden. (Liang ym., 2015)



Kuva 15 Liang Xilianin algoritmin eri vaiheet puunrunгон automaattiselle mallinnukselle (Liang ym., 2012a).

5 Tutkimustulokset

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen tulokset ja vertaillaan niitä keskenään. Luvussa 5.1 käydään läpi manuaalimittausten tulokset. Vertailuissa keskitytään eri keilaimilla tunnistettujen puiden lukumäärään. Lisäksi tarkastellaan erikseen ainoastaan ne puut, jotka ovat olleet mitattavissa molemmista keilausaineistoista. Näiden puiden kohdalla keskitytään keskikorkeuksiin niin puun kokonaispituuden kuin korkeimman mitattavissa olevan läpimitan kannalta. Tarkoitus on selvittää, kummalla keilaimella on onnistuttu saamaan mittaustulos korkeammalta.

Luvussa 5.2 käydään läpi automaattisella algoritmilla saatuja mittaustuloksia. Tässä luvussa vertaillaan mitattavissa olleiden puiden lukumäärää. Lisäksi luvussa verrataan korkeimman mitattavissa olleen rungon läpimittojen korkeuksia keskenään. Nämä korkeudet vastaavat algoritmin laskeman puunrunkomallin ylintä kohtaa. Luvussa 5.2 ei kuitenkaan verrata algoritmilla saatuja puiden korkeuksia keskenään, koska algoritmi on määrittänyt korkeuden perustuen estimaatteihin. Näin ollen puiden korkeudet eivät suoranaisesti korreloi keilainten läpäisykyvyn kanssa.

5.1 Manuaalimittaukset

Manuaalimittausten tarkoituksena oli löytää kaikista koealoista molemmilla mittaustavoilla (SS- ja MS-mittaukset) saadusta pistepilvestä kokonaisten puiden latvat ja jokaisen puunrunkon korkein mitattavissa oleva runkokäyrä.

Single-Scan ja Multi-Scan-mittausten tulokset esitetään neljässä osassa, jossa jokainen osa antaa viitettä keilaimen läpäisykyvystä. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan molempien keilainten havaitsemien kokonaisten puiden lukumäärää. Tällä on tarkoitus selvittää, kummalla keilaimella on saatu koko puu, latvaa myöten, näkyviin. Paremmin läpäisevä keilain havaitsee suuremmalla todennäköisyydellä useamman puun kokonaisuutena. Toinen osa tarkastelee vain ne puut, jotka näkyvät keilausaineistossa kokonaan latvaa myöten ja jotka molemmat keilaimet ovat havainneet. Tällä saadaan verrattua samojen puiden eroja.

Kolmannessa ja neljännessä osassa keskitytään runkojen näkyvyyteen ja runkokäyrän mitattavuuteen. Kolmannessa osassa keskitytään keilainten havaitsemien runkojen kokonaismäärään. Mitä enemmän runkoja on pystytty havaitsemaan, sen paremmin keilaimet ovat läpäisseet edessä olleet lehdet ja oksat. Neljännessä osassa otetaan tarkasteluun vain ne puut, jotka ovat mitattavissa molemmista keilausaineistosta. Tällöin keskitytään siihen, kuinka korkealta rungon läpimitta on ollut mahdollista mitata.

5.1.1 Single-Scan –mittausten erot

Single-Scan –mittauksissa on otettu huomioon ainoastaan koealan keskeltä kuvattu keilausaineisto. MicroStation –ohjelmasta saadut tulokset olivat kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa saatiin puiden latvojen koordinaatit niiden puiden osalta, jotka erottuivat aineistosta kokonaisina puina. Toinen tiedosto sisälsi jokaisen puun korkeimmalta kohdasta mitatun läpimitan koordinaatit niiden puiden osalta, jotka olivat mitattavissa rinnankorkeudelta ja joiden DBH-arvo oli vähintään 5 cm. Näin jokaiselle mitatulle puunlatvalle ja puunrungolle saatiin omat koordinaatit. Koordinaattien korkeudet olivat korkeuksia merenpinnasta. Samassa koordinaatistossa olevan maanpintamallin avulla latvojen korkeudet saatiin muutettua puun korkeuksia vastaaviksi. Tässä luvussa esitetyt tulokset on laskettu edellä mainittujen lukuarvojen perusteella.

Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty jokaisen koealan mittaustulokset. Taulukkoon on kirjattuna koealan vaikeustaso, Leican pulssikeilaimella havaittujen kokonaisten puiden lukumäärä, Trimblen vaihe-erokeilaimella havaittujen kokonaisten puiden lukumäärä sekä havaintojen erot niin lukumäärinä kuin prosentteina.

Taulukko 6: SS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: kokonaisten puiden havaitseminen

Koeala			Leica	Trimble	Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeustaso	Pääpuulaji	Kokonaisten puiden lkm	Kokonaisten puiden lkm	Ero (lkm)	Ero (%)
1002	helppo	Mänty	36	19	17	47,22 %
1016	vaikea	Mänty	37	13	24	64,86 %
1034	keskitaso	Mänty	8	3	5	62,50 %
1045	vaikea	Kuusi	3	2	1	33,33 %
1048	helppo	Mänty	28	16	12	42,86 %
1052	keskitaso	Sekametsä	5	2	3	60,00 %

Taulukon 6 perusteella nähdään, että SS-mittauksissa kokonaisten puiden havaitseminen pulssikeilaimen avulla on huomattavasti parempi kuin vaihe-erokeilaimen avulla tehty mittaustulos. Ero on hieman suurempi koealoissa, joissa vaikeustaso on keskitasoa tai vaikea. Tuloksista voidaan päätellä, että koealan vaikeustaso korreloi keilainten havaintoerojen kanssa. Poikkeuksen muodostaa koeala 1045, jossa eroa on mittaustulosten välillä 33,33%. Tämä poikkeus selittyy sillä, että koealassa havaittuja puita on vain muutamia. Koska kyseisessä koealassa on havaittuja puita hyvin vähän, vaihtelee prosentuaalinen osuus suuresti. Havaittujen kokonaisten puiden lukumäärällä ei vaikuta olevan suoraa yhteyttä havainto-erojen kanssa.

Seuraavaksi otetaan tarkasteluun havaituista puista ne puut, jotka ovat löytyneet molemmista keilausaineistoista. Taulukkoon 7 on koottuna koealakohtaisesti koealan vaikeustaso, yhteisten puiden lukumäärä, molemmilla keilaimilla saadut puiden keskikorkeudet sekä keskikorkeuksien ero. Keilainten väliset erot on kirjattu niin metreinä kuin prosentteina. Keskikorkeudet laskettiin muuttamalla puun latvan z-koordinaatti maanpintamallin avulla puun todelliseksi korkeudeksi.

Taulukko 7: SS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: yhteisten puiden lukumäärä ja niiden keskikorkeudet

Koeala		Leica		Trimble		Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeus- taso	Kokonais- ten puiden lkm	Keski- korkeus (m)	Kokonais- ten puiden lkm	Keskikor- keus (m)	Keskikorkeuksien ero (m)	Ero (%)
1002	helppo	19	19,74	19	19,52	0,22	1,13 %
1016	vaikea	13	15,95	13	15,92	0,03	0,17 %
1034	keskitaso	3	23,55	3	23,09	0,46	1,96 %
1045	vaikea	2	18,12	2	17,89	0,23	1,28 %
1048	helppo	16	19,67	16	19,20	0,46	2,36 %
1052	keskitaso	2	6,56	2	6,52	0,04	0,53 %

Kuten tuloksista nähdään, on Leican pulssikeilaimella onnistuttu saamaan puun latva mitattua aavistuksen verran korkeammalta kuin Trimblen vaihe-erokelaimella. Korkeusero selittyy pääosin sillä, että puiden latvat ovat aineistossa säilyttäneet puulle ominaisen muotonsa, vaikka todellisuudessa ylimmät oksat ovat jääneet aineistosta pois. Korkeudet on saatu jokaisessa koealassa mitattua pulssikeilaimella korkeammalta kuin mitä vaihe-erokelaimella on saatu. Mittaustulosten erot ovat kuitenkin vain muutaman prosentin luokkaa, joten keilainten välillä ei ole tässä tapauksessa merkittävää eroa. Huomioitava seikka on kuitenkin se, että keskikorkeuksissa on enemmän vaihtelua koealoissa, joissa puiden keskikorkeudet ovat korkeammat. Tämä selittyy todennäköisesti sillä, että korkeammalla olevat puiden latvat ovat myös kauempana keilaimesta. Tällöin pistetiheys korkeiden puiden latvojen läheisyydessä on pienempi, jolloin läpäisevyyden merkitys kasvaa.

Seuraavaksi tarkastellaan tuloksia liittyen yksittäisten puunrunkojen korkeimpaan mitattavissa olevaan läpimittaan. Alla olevassa taulukossa 8 on esitettyä koealoittain koealan vaikeustaso, molempien keilainten havaitsemat puunrunkojen lukumäärät sekä keilainten väliset havaintoerot. Kyseessä on kaikki puun rungot, jotka ovat olleet mitattavissa rinnankorkeudelta ja joiden DBH-arvo on ollut vähintään 5 cm.

Taulukko 8: SS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: runkojen lukumäärä.

Koeala		Leica	Trimble	Leica vs Trimble		
Tunnus	Vaikeustaso	Pääpuu- laji	Runkojen lkm	Runkojen lkm	Runkojen lukumäärä	Ero (%)
1002	helppo	Mänty	36	34	2	5,56 %
1016	vaikea	Mänty	81	58	23	28,40 %
1034	keskitaso	Mänty	25	25	0	0,00 %
1045	vaikea	Kuusi	45	42	3	6,67 %
1048	helppo	Mänty	34	34	0	0,00 %
1052	keskitaso	Sekametsä	87	69	18	20,69 %

Yllä olevasta taulukosta nähdään, että pulssikeilaimella tehtyjen mittausten avulla on havaittu puunrunkoja paremmin kuin vaihe-erokelaimella tehdyillä mittauksilla. Kuitenkin

suurimmassa osassa koealoista eroa ei ollut ollenkaan tai kyse oli vain muutamasta puunrungosta. Eniten vaikutusta puunrungon näkyvyyteen vaikutti olevan vaikeassa mäntymetsässä (koeala 1016), jossa männyn osuus oli lähes 90 %. Tulosten perusteella mitä tiheämpi metsä on kyseessä, sen enemmän näyttäisi olevan eroa eri keilaustekniikoiden välillä. Runkojen lukumäärä ja maasto-olosuhteet korreloivat tässä tapauksessa mittaustulosten erojen kanssa. Tämä tulos on ymmärrettävää, koska tiheimmässä metsässä puut ovat yleensä alikasvuisia, jolloin oksatkin ovat melko matalalla. Tällöin matalalla olevat oksat muodostavat näköesteitä kauimmaisille puille, jolloin kaukana olevien puiden puunrungot jäävät katveeseen. Lisäksi alikasvuisten puiden omat oksat estävät lasersäteiden kulkeutumisen oksien läpi runkoihin asti, jolloin rungosta saadut pistehavainnot jäävät tässäkin tapauksessa hyvin vähäiselle.

Viimeisessä SS-mittausten tuloksissa tarkastellaan puunrunkoja, jotka molemmat keilaimet ovat havainneet. Taulukossa 9 on koottuna koealakohtaisesti koealan vaikeustaso, yhteisten puiden lukumäärä, pulssikeilaimen aineistosta saatu jokaisen puun korkeimmalta kohtaa mitattujen runkojen läpimittojen keskipituudet, vaihe-erokeilaimen aineistosta saatu jokaisen puun korkeimmalta kohtaa mitattujen runkojen läpimittojen keskipituudet sekä läpimittojen keskipituuksien ero molemmilla keilaimilla niin metreissä kuin prosentteissa.

Taulukko 9: SS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: yhteisten runkojen lukumäärä ja mitattujen korkeimpien läpimittojen keskipituudet.

Koeala		Leica		Trimble		Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeustaso	Puiden lkm	Ylimmän läpimitan keskipituus	Puiden lkm	Ylimmän läpimitan keskipituus	Keskipituuksien ero (m)	Ero (%)
1002	helppo	34	13,92	34	12,90	1,01	7,28 %
1016	vaikea	57	13,99	57	12,18	1,81	12,90 %
1034	keskitaso	25	12,00	25	10,99	1,01	8,44 %
1045	vaikea	42	14,51	42	11,16	3,35	23,08 %
1048	helppo	34	16,96	34	15,40	1,56	9,20 %
1052	keskitaso	69	7,42	69	6,29	1,13	15,22 %

Läpimittojen keskipituudet on laskettu ottamalla yksittäisen puun korkein mitattavissa oleva läpimitta, jonka jälkeen korkeuksien etäisyydet maanpinnasta laskettiin maanpintamallin avulla. Tämän jälkeen kaikkien puiden mittauskorkeuksista laskettiin koealakohtaiset keskiarvot, jotka löytyvät yllä olevasta taulukosta 9.

Taulukosta 9 nähdään, kuinka paljon läpäisevyys vaikuttaa mittauskorkeuteen. Jokaisessa koealassa pulssikeilaimella on pystytty keskimäärin mittaamaan runkokäyrä noin 1-3 metriä korkeammalta kuin mitä vaihe-erokeilaimella pystyttiin. Kyseessä on 7...23% ero riippuen koealan vaikeustasosta. Mitä vaikeampi ja tiheämpi koeala on, sen suurempi merkitys keilaimen läpäisykyvyllä on. Toisaalta puiden koealla sijaitsevien puiden keskipituudella ei vaikuta olevan selvää korrelaatiota ylimmän mitattavissa olevan rungoston läpimitan korkeuden kanssa, kun verrataan tuloksia taulukossa 7 olevien tulosten kanssa. Helppoissa koealoissa mittaustekniikoiden välillä on noin 10% ero, kun vastaavasti vaikeissa koealoissa eroa on jopa 23%. Toisin sanoen pulssikeilaimilla saadaan puunrungot näkyviin parhaimmillaan lähes neljäsosan enemmän kuin mitä vastaavanlaisella vaihe-erokeilaimella saadaan.

5.1.2 Multi-Scan –mittausten erot

Multi-Scan –mittausten avulla saadut tulokset ovat peräisin viiden keilauksen yhdistelmästä. Mittausasetelma on esitetty tarkemmin luvussa 4. Mittausperiaate on ollut täysin sama kuin SS-mittauksissa. Tarkoitus on ollut laskea kaikki kokonaiset puut, jolloin niiden latvojen koordinaatit on otettu ylös. Samalla on laskettu jokaisen puunrungon, jonka DBH-arvo on ollut vähintään 5cm, korkeimman mitattavissa olevan läpimitan koordinaatit. Koordinaattien perusteella laskettiin todelliset mittauskorkeudet hyödyntäen aiemmin laskettua maanpintamalla.

Alla olevaan taulukkoon 10 on listattuna koealakohtaisesti koealan vaikeustaso, MS-tapauksessa havaittujen kokonaisten puiden lukumäärät molemmilla keilausmenetelmillä sekä lukumäärien erot. Taulukko 10 osoittaa sen, että pulssikeilaimella saadaan puun latvat näkyviin parhaimmillaan jopa 50% paremmin kuin vaihe-erokeilaimilla. Samalla nähdään kuinka koealan vaikeustaso vaikuttaa tulokseen. Helppoissa koealoissa eroa on 0 % ja 18 %, jotka molemmat ovat huomattavasti pienempiä kuin muiden koealojen luvut 42...53 %. Koealan pääpuulajilla ei tässä tapauksessa ole huomattavaa merkitystä. Kokonaisuudessaan MS-mittauksissa pulssikeilain havaitsee keskimäärin noin 37 % enemmän kokonaisia puita verrattuna vaihe-erokeilaimen. Toisin sanoen Leica havaitsee puustomittauksissa keskimäärin 16 puunrunkoa enemmän kuin Trimble.

Taulukko 10: MS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: kokonaisten puiden havaitseminen

Koeala			Leica	Trimble	Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeustaso	Pääpuulaji	Kokonaisten puiden lkm	Kokonaisten puiden lkm	Ero (lkm)	Ero (%)
1002	helppo	Mänty	42	42	0	0,00 %
1016	vaikea	Mänty	100	52	48	48,00 %
1034	keskitaso	Mänty	32	15	17	53,13 %
1045	vaikea	Kuusi	21	12	9	42,86 %
1048	helppo	Mänty	37	30	7	18,92 %
1052	keskitaso	Sekametsä	30	14	16	53,33 %

Taulukkoon 11 on koottuna ne puut, jotka on havaittu molemmista keilausaineistosta. Taulukko sisältää koealakohtaisesti koealan vaikeustason, havaittujen puiden keskikorkeudet molemmilla keilaimilla sekä näiden keskikorkeuksien erot. Yhteisten puiden lukumäärä on täysin sama kuin kaikki Trimblellä havaittujen puiden lukumäärät edellisessä taulukossa 10. Tästä huomataan, että Trimblellä ei ole havaittu yhtään kokonaista puuta, jota ei Leicalla olisi onnistuttu havaitsemaan.

Taulukko 11: MS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: yhteisten puiden lukumäärä ja niiden keskikorkeudet

Koeala		Leica		Trimble		Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeus-taso	Kokonaisten puiden lkm	Keskikorkeus (m)	Kokonaisten puiden lkm	Keskikorkeus (m)	Keskikorkeuksien ero (m)	Ero (%)
1002	helppo	42	20,32	42	19,82	0,50	2,45 %
1016	vaikea	52	16,16	52	16,10	0,06	0,36 %
1034	keskitaso	15	16,72	15	16,66	0,06	0,34 %
1045	vaikea	12	22,68	12	22,54	0,14	0,60 %
1048	helppo	30	21,75	30	21,59	0,17	0,77 %
1052	keskitaso	14	11,59	14	11,59	0,00	-0,02 %

Leican ja Trimblen avulla saadut puiden keskikorkeudet ovat yllä esitettyssä taulukossa 11 hyvin saman suuruiset. Suurin ero löytyy koealasta 1002, jossa keskikorkeuden määrittäminen heittää 2,45 %:lla. Muissa tapauksissa eroa on alle prosentin luokkaa. Vaikka eroa onkin alle prosentin verran, on lähes kaikissa koealoissa ero pulssikeilaimen eduksi, jolloin voidaan katsoa tuloksen tukevan väitettä, jonka mukaan pulssikeilaimen läpäisevyys on parempi metsämittauksissa. Koealan vaikeustaso ei näissä tuloksissa erotu sen erityisemmin. Myöskään havaittujen puiden lukumäärä ei korreloi mittaustulosten kanssa. Toisaalta puiden keskikorkeudet vaikuttavat SS-tapauksen tapaan hieman mittauseroon. Koealat, joissa puiden keskikorkeus oli yli 20 metriä, olivat erot suuremmat kuin koealoissa, joissa puiden keskikorkeudet jäivät 11-16 metriin. Tämä selittyy sillä, että pistetiheys on harvempaa sitä mukaan, miten kaukana mitattava kohde on keilaimesta.

Seuraava tarkastelukohde oli MS-mittauksista saatujen ylimpien mitattavissa olevien läpimittojen tulokset. Alla olevassa taulukossa 12 on esitettyä koealakohtaisesti koealan vaikeustaso, kaikki havaitut rungot molemmilla keilausmenetelmillä sekä näiden menetelmien erot keskenään. Kyseessä ovat vain ne puut, jotka olivat mitattavissa rinnankorkeudelta ja joiden DBH-arvo oli vähintään 5 cm.

Taulukko 12: MS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: runkojen lukumäärä.

Koeala		Leica	Trimble	Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeustaso	Runkojen lkm	Runkojen lkm	Erotus (lkm)	Ero (%)
1002	helppo	42	42	0	0,00 %
1016	vaikea	106	106	0	0,00 %
1034	keskitaso	50	46	4	8,00 %
1045	vaikea	60	59	1	1,67 %
1048	helppo	37	34	3	8,11 %
1052	keskitaso	133	127	6	4,51 %

Taulukosta 12 nähdään, kuinka puunrunkojen löytymisen kannalta ei ole merkittäviä eroja keilausmenetelmien välillä, kun kyseessä on MS-mittaustapa. Tämä selittyy osittain sillä,

että useamman keilauksen tapauksessa keilausasemat jakautuvat koealan ympäristölle tasaisesti, jolloin lähes kaikki koealan puunrungot saadaan näkyviin. Toinen asia on se, kuinka korkealle puunrungot saadaan näkyviin. Vaikka puunrunkoja havaittiin molemmilla mittausmenetelmillä lähes yhtä monta, ovat mittaustulokset edelleen pulssikeilaimen puolella. Puls-sikeilaimilla saatiin jokaisessa koealassa vähintään yhtä monta puuta näkyviin kuin vaihe-erokeilaimella. Useammassa koealassa saatiin jopa muutaman puun verran enemmän. Koealan vaikeustasolla ei näytä olevan suurta merkitystä. Suurimmat erot olivat helpossa koealassa 1048, keskitason koealassa 1052 sekä vaikeassa koealassa 1034. Muiden koealojen osalta mittausten välinen ero oli joko nolla tai muuten merkityksettömän pieni.

Viimeisessä MS-mittausten taulukossa 13 verrataan runkojen ylimpien läpimittojen tuloksia niiden puiden osalta, jotka näkyvät molemmille keilaimille. Taulukkoon on kirjattuna koealakohtaisesti vaikeustaso, yhteisten puiden lukumäärä, eri keilaimilla saatu ylimpien läpimittojen keskikorkeus sekä keskikorkeuksien välinen ero. Edelleen huomataan, että yhteisten puiden lukumäärä on sama kuin yllä olevassa taulukossa olevien Trimblellä havaittujen runkojen lukumäärä. Tämä tarkoittaa sitä, että Trimblen keilaimella ei ole saatu mitattua yhtään puuta, joka ei olisi ollut mitattavissa Leican aineistosta.

Taulukko 13: SS-mittaustavalla saadut tulokset molempien keilainten osalta: yhteisten runkojen lukumäärä ja mitattujen runkokäyrien keskikorkeudet.

Koeala		Leica		Trimble		Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeus-taso	Puiden lkm	Ylimpien läpimittojen keskikorkeus	Puiden lkm	Ylimpien läpimittojen keskikorkeus	Keskikorkeuksien ero (m)	Ero (%)
1002	helppo	42	15,48	42	14,16	1,32	8,52 %
1016	vaikea	106	14,62	106	13,78	0,85	5,78 %
1034	keskitaso	46	14,42	46	12,86	1,55	10,78 %
1045	vaikea	59	16,38	59	14,51	1,87	11,40 %
1048	helppo	34	18,19	34	17,40	0,79	4,35 %
1052	keskitaso	127	9,09	127	7,59	1,50	16,53 %

Taulukosta 13 nähdään selvästi, kuinka Leican pulssikeilaimella on pystytty mittaamaan runkokäyrä selvästi korkeammalta kuin Trimblen vaihe-erokeilaimella. Leicalla on saatu keskimäärin puiden runko mitattua keskimäärin 1,3 metriä korkeammalta kuin Trimblellä. Tämä tarkoittaa sitä, että Trimblen keilaimella saadaan keskimäärin 9,3 % vähemmän puunrunkoa näkyviin. Koealojen välinen ero mittaustuloksissa ei vaikuta selittyvän yksinomaan koealan vaikeustasolla, koska vaikeustason ja tulosten välillä ei ole selvää riippuvuussuhdetta. Myöskään koealalla havaittujen puiden lukumäärä ei vaikuta korreloivan keilainten mittauserojen kanssa. Kun tuloksia verrataan taulukon 11 saatuihin tuloksiin, ei vaikuta siltä, että taulukon 13 tulokset olisivat riippuvaisia koealalla olevien puiden keskikorkeuksien kanssa.

5.2 Automaattiset mittaukset

Automaattisessa puidentunnistuksessa käytettiin Xinlian Liangin kehittämää algoritmia, jonka tehtävänä oli tunnistaa puunrungot koealasta automaattisesti. Algoritmi tarkasteli jokaista puunrunkoa yksittäin ja muodosti usean runkosylinterin avulla puun rungon siltä osin kuin se keilausaineistossa näkyi. Tämän tiedon perusteella algoritmi pyrki ennustamaan

puun korkeuden. Algoritmin tulokset on esitettyä tässä luvussa kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan algoritmin mittaamaa korkeinta rungon läpimittaa. Toisessa osassa verrataan eri keilainten välisiä eroja tunnistettujen puiden lukumäärän kannalta. Tulokset on laskettu molemmissa mittausasetelmissä (SS ja MS).

5.2.1 Single-Scan –mittausten erot

Manuaalimittausten tapaan Single-Scan -mittaukset sisältävät vain koealan keskeltä mitatut keilaukset. Aineisto on täysin sama kuin manuaalimittauksissa käytetty aineisto. Alla olevassa taulukossa 14 on esitettyä koealakohtaisesti koealan vaikeustaso ja pääpuulaji, havaittujen puiden lukumäärä molemmilla keilaimella sekä havaintojen erot. Havaittujen puiden lukumäärä riippuu siitä, kuinka moni puu on ollut mitattavissa rinnankorkeudelta. Algoritmi on ottanut laskennassa huomioon kaikki mitattavissa olleet puut, jopa ne joiden DBH-arvo on alle 5cm.

Taulukko 14: SS-mittaustavan tulokset: algoritmilla saadut tulokset havaittujen puiden lukumäärästä.

Tunnus	Koeala		Leica	Trimble	Leica vs Trimble	
	Vaikeustaso	Pääpuulaji	Havaittujen puiden lkm	Havaittujen puiden lkm	Puiden lukumäärien ero (lkm)	Puiden lukumäärien ero (%)
1002	helppo	Mänty	39	36	3	7,7 %
1016	vaikea	Mänty	80	67	13	16,3 %
1034	keskitaso	Mänty	48	30	18	37,5 %
1045	vaikea	Kuusi	50	43	7	14,0 %
1048	helppo	Mänty	34	35	-1	-2,9 %
1052	keskitaso	Sekametsä	84	63	21	25,0 %

Taulukoon kootuista tuloksista nähdään, että Leican aineistosta on löydetty lähes jokaisessa koealassa enemmän puita. Poikkeuksen tuo koeala 1048, jossa Trimblellä on havaittu yksi puu enemmän. Kyseinen koeala on vaikeustasoltaan helppo, joten ero ei ole todennäköisesti johtunut läpäisykyvyn takia. On hyvin mahdollista, että tämän puun osalta Leican eteen on sattunut mittaushetkellä jokin este, joka on peittänyt Leican näkyvyyden kyseisen puun kohdalla. Tähän poikkeukseen ja sen mahdollisiin syihin palataan tarkemmin luvussa 6. Muiden koealojen osalta Leican aineistosta on saatu mitattua keskimäriin 20 % enemmän puita kuin mitä Trimblen keilaimella saatiin.

Tulosten perusteella koealan vaikeustasolla on jonkin verran merkitystä keilainten välisiin eroihin. Helppoissa koealoissa ero on pienempi verrattuna muiden tasojen koealoihin. Toisaalta vaikean ja keskitason koealoilla ei ole selvää eroa. Kuitenkin koealalla havaittujen puiden lukumäärän ja vaikeustason yhteisvaikutuksella vaikutta olevan yhtäläisyyksiä mittaustulosten kanssa. Mitä vaikeampi ja tiheämpi koeala on, sitä enemmän keilainten välillä on eroa.

Seuraavaksi tarkastellaan havaittujen puiden korkein mitattavissa oleva rungon läpimitta. Tarkasteluun otetaan vain ne puut, jotka on havaittu molemmilla keilausmenetelmillä, jotta mittaustulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia. Taulukkoon 15 on listattuna koealakohtaisesti koealan vaikeustaso, pääpuulaji, yhteisten puiden lukumäärä, algoritmin mittaamien

puiden korkeimman mitatun läpimitan keskiarvot molemmilla keilaimilla sekä keskikorkeuksien erot keilainten välillä.

Taulukko 15: SS-mittaustavan tulokset: algoritmin avulla saadut tulokset puiden korkeuksista.

Tunnus	Koeala		Leica	Trimble	Leica vs Trimble		
	Vaikeustaso	Pääpuulaji	Ylimpien läpimittojen keski- korkeus	Ylimpien läpimittojen keski- korkeus	Yhteisten puiden lkm	Keskikorkeuden ero (m)	Keskikorkeuden ero (%)
1002	helppo	Mänty	13,56	13,52	36	0,04	0,31 %
1016	vaikea	Mänty	14,49	12,68	67	1,81	12,52 %
1034	keskitaso	Mänty	12,49	11,97	30	0,52	4,13 %
1045	vaikea	Kuusi	10,45	9,87	43	0,58	5,53 %
1048	helppo	Mänty	16,14	15,35	34	0,80	4,92 %
1052	keskitaso	Sekametsä	7,87	7,22	63	0,65	8,24 %

Tuloksista nähdään jokaisen koealan kohdalla, että SS-tilanteessa Leican tuloksilla on pystytty saamaan puunrunkoa mitattua korkeammalta kuin Trimblen tuloksilla. Eniten vaihtelua on tiheissä ja vaikeissa koealoissa. Mitä enemmän koealassa on puita ja mitä vaikeampi koeala on, sen isompi on korkeuksien prosentuaalinen ero. Tulos on ymmärrettävä, koska läpäisevyyden merkitys kasvaa tiheissä ja vaikeissa koealoissa. Tulos vahvistaa hypoteesia, jonka mukaan pulssikeilaimen läpäisevyys metsämittauksissa olisi parempi verrattuna vaihe-erokeilaimen. Kokonaisuudessaan Leican aineistosta saadaan keskimäärin 6% runkoa enemmän näkyviin verrattuna Trimblen aineistoon.

5.2.2 Multi-Scan –mittausten erot

Multi-Scan –mittaukset sisältävät manuaalimittausten tapaan viisi yhdeltä koealalta otettua keilausta, jotka yhdistettiin rekisteröinnin avulla yhdeksi pistepilviaineistoksi. Kyseessä on sama aineisto, jota käsiteltiin manuaalimittauksissa. Algoritmin tulokset on koottuna alla oleviin taulukoihin 16 ja 17.

Taulukossa 16 on koottuna koealakohtaisesti koealan vaikeustaso ja pääpuulaji sekä MS-tapauksessa algoritmin havaitsemien puiden lukumäärä ja näiden lukumäärien erotus. Tästäkin algoritmi on mitannut kaikki ne puut, jotka ovat olleet mitattavissa rinnankorkeudelta. Myös ne puut, joiden DBH-arvo on ollut alle 5 cm, ovat näissä tuloksissa otettu laskennassa huomioon.

Taulukko 16: MS-mittaustavan tulokset: algoritmilla saadut tulokset havaittujen puiden lukumäärästä.

Koeala			Leica	Trimble	Leica vs Trimble	
Tunnus	Vaikeus-taso	Pää-puulaji	Havaittujen puiden lkm	Havaittujen puiden lkm	Puiden lukumäärien ero (lkm)	Puiden lukumäärien ero (%)
1002	helppo	Mänty	43	42	1	2,3 %
1016	vaikea	Mänty	103	97	6	5,8 %
1034	keskitaso	Mänty	104	93	11	10,6 %
1045	vaikea	Kuusi	66	62	4	6,1 %
1048	helppo	Mänty	41	42	-1	-2,4 %
1052	keskitaso	Sekametsä	173	140	33	19,1 %

Taulukosta 16 nähdään, kuinka Leicalla on lähes kaikista koealoista saatu enemmän puita näkyviin verrattuna Trimbleen. Poikkeuksena on koeala 1048, jossa Trimblen aineistosta on saatu yksi puu enemmän havaittua. Sama ero oli havaittavissa SS-mittauksissakin. Toisin sanoen kyse on samasta puusta, joka on jäänyt jostain syystä Leicalta havaitsematta. Muiden koealojen osalta Leican keilaimella on saatu keskimäärin 14 % enemmän puita näkyviin kuin mitä Trimblen keilaimella on saatu. Taulukosta myös nähdään, että koealan vaikeustaso ja siellä esiintyneiden puiden lukumäärä korreloivat mittauserojen kanssa. Helpoissa koealoissa havaitaan helpommin kaikki puut, jolloin läpäisevyyden merkitys ei ole niin suuri. Läpäisevyys korostuu tiheissä koealoissa, joissa näkyvyys on huono.

Taulukoon 17 on koottuna algoritmin laskemat ylimpien läpimittojen keskipöytäkorkeudet jokaiselta koealalta molempien keilainten osalta. SS-tapauksen tapaan taulukkoon on koottuna keskipöytäkorkeuksien erot koealoittain. Taulukon tuloksista huomioitava seikka on saadut keskipöytäkorkeudet, jotka ovat osittain pienempiä kuin SS-tapauksissa. Esimerkiksi koealan 1034 Trimblellä saatu keskipöytäkorkeus on 11,43 metriä. Vastaava lukuarvo SS-mittauksissa on 11,97 metriä. Nämä erot selittyvät sillä, että MS-tapauksessa havaittuja puita on huomattavasti enemmän kuin SS-tapauksessa. Etenkin tiheissä metsissä pienemmät puut jäävät SS-mittauksissa katveeseen. Näin ollen MS-tapauksessa havaitut pienet puut saattavat antavaa kokonaiskeskiarvolle pienemmän lukuarvon verrattuna SS-tapaukseen.

Taulukko 17: MS-mittaustavan tulokset: algoritmin avulla saadut tulokset puiden korkeuksista.

Koeala			Leica	Trimble	Leica vs Trimble		
Tunnus	Vaikeus-taso	Pää-puulaji	Ylimpien läpimittojen keskipöytäkorkeus	Ylimpien läpimittojen keskipöytäkorkeus	Yhteisten puiden lkm	Keskipöytäkorkeuden ero (m)	Keskipöytäkorkeuden ero (%)
1002	helppo	Mänty	14,55	13,91	42	0,64	4,41 %
1016	vaikea	Mänty	15,67	14,85	97	0,82	5,26 %
1034	keskitaso	Mänty	11,91	11,43	93	0,48	4,03 %
1045	vaikea	Kuusi	13,52	13,33	62	0,12	1,45 %
1048	helppo	Mänty	14,51	14,72	41	-0,21	-1,44 %
1052	keskitaso	Sekametsä	8,52	8,02	140	0,50	5,81 %

Tuloksista nähdään, että jokaisessa koealassa keskikorkeuden määrittäminen on ollut Leican pulssikeilaimella korkeampi kuin Trimblen vaihe-erokeilaimella mitattuna. Poikkeuksena on koeala 1048, jossa runkoa on saatu Leican keilaimella keskimäärin 1,44 prosenttia vähemmän näkyviin verrattuna Trimbleen. Poikkeama on verrattain pieni ja se saattaa johtua siitä, että kyseisessä koealassa on havaittu Trimblellä yksi puunrunko enemmän verrattuna Leicaan. Ylimääräisen puunrunгон vaikutuksia saatuun tulokseen käsitellään lisää pohdintaosiossa. Muiden koealojen osalta huomioitavaa on, ettei MS-tapauksessa koealan vaikeustaso tai puiden lukumäärä vaikuta merkittävästi keskikorkeuksien eroihin. Tulokset tukevat kuitenkin kaikkia edellä läpi käytyjä SS- ja MS-tapausten tuloksia niin manuaalimittauksissa kuin automaattisissa mittauksissa.

6 Pohdinta

Edellä esitettyjen tulosten perusteella Leican pulssikeilaimen läpäisevyys on ollut Trimblen vaihe-erokeilainta parempi kaikissa tilanteissa, joissa läpäisevyydellä on ollut merkitystä. Tässä luvussa pohditaan tarkemmin tutkimuksessa saatua tulosta sekä eri tekijöiden vaikutuksia lopputulokseen ja niiden suhdetta läpäisykykyyn.

Taulukkoon 18 on koottuna SS- ja MS-mittaustulosten erot manuaalimittausten tapauksessa. Taulukon lukuarvot edustavat kaikkien koealojen keskiarvoa. Vertailtavana ovat havaittujen kokonaisten puiden lukumäärä, yhteisten puiden keskipöytäkorkeudet, havaittujen runkojen lukumäärä sekä yhtenäisten puunrunkojen läpimittojen korkeimpien mittauskorkeuksien keskiarvot.

Taulukon ensimmäisestä osasta (kokonaisten puiden lukumäärä) nähdään, että SS-tapauksissa Leican ja Trimblen tulosten erot vaihtelevat keskimäärin 51,8 %, kun taas vastaavasti MS-mittauksissa sama ero on hieman alhaisempi, 37,0 %. Ero on SS-mittauksissa korkeampi, koska SS-mittauksissa keilaimen läpäisykyvyn merkitys on metsämittauksissa suurempi. Yhdestä asemasta keilain havaitsee puut huonosti lehtien, oksien ja muiden esteiden takia. Siksi paremman läpäisevyyden omaava keilain havaitsee huomattavasti enemmän kohteita kuin heikomman läpäisykyvyn omaava keilain.

Seuraavaksi tarkastellaan taulukon toista osaa (yhtenäisten puiden korkeudet), johon on koottu ne puut, jotka on havaittu molemmilla keilaimilla. Tuloksista nähdään, että puiden korkeudet ovat lähestulkoon samat. Korkeuserot ovat Leican keilaimella SS-tapauksissa 0,24 m ja MS-tapauksissa 0,15 m korkeammat kuin Trimblen keilaimella. Trimblen keilaimella mitatut kokonaiset puut ovat saattaneet mittausvaiheessa vaikuttaa kokonaisilta, koska ne ovat säilyttäneet puille ominaisen muodon. Todellisuudessa puu on saattanut olla hieman korkeampi. Tämä selittää sen, miksi keilainten välillä on eroa puiden pituuksien kannalta. Vaikka ero on suhteellisen pieni, on Leican läpäisevyys kuitenkin parempi. Tässäkin tapauksessa SS-mittauksen tuloksessa ero on lähes kaksi kertaa suurempi kuin MS-mittauksen ero.

Taulukon 18 kolmannessa osassa (runkojen lukumäärä) on laskettu havaittujen puunrunkojen lukumäärä, joka muutettiin kaikkien koealojen keskiarvoksi. SS-tapauksissa Leicalla tehdyt havainnot ovat keskimäärin 7 puuta enemmän kuin Trimblellä tehdyissä havainnoissa. Vastaava luku on MS-tapauksissa 2. Muiden muuttujien tapaan tässä toistuu sama kaava, jonka perusteella SS-tapauksessa keilainten välinen ero on suurempi kuin MS-tapauksessa. Tässä tapauksessa ero SS- ja MS-tapausten välillä on lähes kolminkertainen. Lopputulos indikoi muiden osien tapaan Leican paremmasta läpäisevyydestä.

Taulukon 18 viimeisessä osassa (yhtenäisten runkojen ylin läpimitta) on koottu molempien keilainten havaitsemat yhteiset puunrungot ja laskettu niiden ylimpien mitattavissa olevien läpimittojen keskipöytäkorkeudet. Leicalla saatu tulos on keskimäärin 1,6 metriä parempi kuin Trimblellä, kun kyse on SS-mittauksista. Toisin sanoen puunrunkoa nähdään Leican aineistosta keskimäärin 1,6 metriä korkeammalle. MS-mittauksissa vastaava luku on 1,3 metriä Leican hyväksi. Leican ja Trimblen välinen ero on tässä tapauksessa huomattavan suuri. Kuitenkaan SS ja MS-mittausten väliset erot eivät ole kovin suuret. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tarkastelussa oli vain ne puut, jotka molemmat keilaimet havaitsivat, jolloin mittausasetelma ei vaikuttanut kovin paljon lopputulokseen.

Taulukko 18: Manuaalimittausten tulokset kaikkien koalojen osalta: SS- ja MS-mittaustapojen erojen keskiarvot molemmilla keilaimilla.

	Koalo- jen lkm	Mittaustapa	Yksikkö	Leica	Trimble	Leica vs Trimble ero
Kokonaisten puiden lkm	6	SS	Lkm	19,50	9,17	10,33 (51,8 %)
	6	MS	Lkm	43,67	27,50	16,17 (37,0 %)
Yhtenäisten puiden korkeudet	6	SS	Keskikorkeus	17,26	17,02	0,24 (1,2 %)
	6	MS	keskikorkeus	18,20	18,05	0,15 (0,7 %)
Runkojen lukumäärä	6	SS	lkm	51,33	43,83	7,50 (9,8 %)
	6	MS	lkm	71,33	69,00	2,33 (3,7 %)
Yhtenäisten runkojen ylin läpimitta	6	SS	keskikorkeus	13,13	11,49	1,64 (12,7 %)
	6	MS	keskikorkeus	14,70	13,38	1,31 (9,6 %)

Jokaista osa-aluetta tutkittaessa päädyttiin manuaalimittausten kannalta kokonaisuudessaan lopputulokseen, jonka mukaan Leican pulssikeilaimen läpäisykyky on parempi verrattuna Trimblen vaihe-erokeilaimen. Merkittävä seikka on se, että erot ovat jokaisella osa-alueella olleet SS-tapauksessa suurempia kuin MS-tapauksessa. Syy tähän on yksinkertainen. Ympäristössä vallitsevien näköesteiden takia SS-tapauksessa keilaimen läpäisevyydellä on suurempi rooli metsämittauksissa.

Seuraavaksi siirrytään tarkastelemaan automaatiomittausten lopputuloksia kaikkien koalojen keskiarvoina. Taulukkoon 19 on koottuna SS- ja MS tapauksista saadut lopputulokset kaikkien koalojen osalta keskiarvoina. Taulukossa 19 ei ole taulukon 18 mukaan koottuna puiden korkeuksia, koska korkeudet perustuvat estimaatteihin eikä estimaateilla saada todellista tietoa keilainten läpäisevyydestä.

Taulukon 19 ensimmäisessä osassa (runkojen lukumäärä) on koottu algoritmilla saadut mitaushavainnot runkojen lukumäärästä molempien keilainten osalta. Runkoja löytyi Leican keilaimella SS-tapauksessa 16 % ja MS-tapauksessa 7 % enemmän kuin Trimblen keilaimella. Tässä tapauksessa SS- ja MS-tapausten välillä ei ole kovin merkittävää eroa toisin kuin manuaalimittauksissa. Ero on kuitenkin merkittävän suuri ja se on selvästi hypoteesia tukeva tulos.

Algoritmilla saadut erot ovat edellä esitettyjen taulukoiden 18 ja 19 perusteella merkittävästi pienempiä verrattuna manuaalimittausten yhteydessä saatuihin eroihin. Syy löytyy havaittujen runkojen lukumäärästä, joka on manuaalimittauksissa huomattavasti pienempi kuin automaatiomittauksissa. Algoritmi on ottanut mittauskohteiksi myös puut, jotka ovat alle 5 cm halkaisijaltaan. Näitä puita oli aineistoissa huomattavan paljon, jolloin koalakohtainen keskiarvo puiden lukumäärälle nousi suureksi. Esimerkiksi SS-tapauksissa niin manuaalimitauksessa kuin automaatiomittauksessa keilainten välinen ero puiden lukumäärässä oli noin 10 puuta. Koska automaatiomittauksessa on mukana kaikki pienet puut, on suhteellinen ero huomattavasti pienempi.

Alla olevan taulukon toisessa osassa (yhtenäisten runkojen ylin läpimitta) Leicalla on Trimbleen verrattuna onnistuttu saamaan SS-tapauksessa noin 6 % ja MS-tapauksessa noin 3 % runkoa enemmän näkyviin. Ero on edelleen merkittävä, koska kyseessä on useiden kymmenien senttimetrien ero. Tässäkin tapauksessa manuaalimittauksissa saadut vastaavat tulokset olivat huomattavasti suurempia. Syy tälle saattaa löytyä pienistä puista, joita ei manuaalimittauksissa otettu huomioon. Läpimitaltaan pienet puut ovat yleensä myös pituudeltaan lyhyitä eikä niiden ympärillä ole kovin tiheää oksastoa. Tällaisten puiden rungot saadaan melko hyvin näkyviin. Näin ollen automaattisessa mittauksessa mukana on runsaasti pieniä puita, jotka ovat todennäköisesti näkyneet molemmille keilaimille. Tällöin nämä puut pienentävät huomattavasti keilainten välistä eroa lopputuloksissa.

Taulukko 19: Algoritmin tulokset kaikkien koealojen osalta: SS- ja MS-mittaustapojen erojen keskiarvot molemmilla keilaimilla.

	Koealo- jen lkm	Mittaus- tapa	Yksikkö	Leica	Trimble	Leica vs Trimble ero
Runkojen lukumäärä	6	SS	lkm	55,83	45,67	10,17 (16,3 %)
	6	MS	lkm	88,33	79,33	9,00 (6,9 %)
Yhtenäisten runkojen ylin läpimitta	6	SS	keskikorkeus m	12,50	11,77	0,73 (5,9 %)
	6	MS	keskikorkeus m	13,11	12,71	0,39 (3,3 %)

Yllä olevaan taulukkoon liittyvä varteenotettava huomio on se, että taulukko sisältää myös taulukoissa 14, 16 ja 17 esiintyvät negatiiviset tulokset koealan 1048 kohdalla. Taulukoiden 14 ja 16 mukaan Trimblellä saatiin yksi puu enemmän näkyviin verrattuna Leicalla saatuihin puihin. Tarkempi tarkastelu osoitti, että algoritmin havaitsema ylimääräinen puu oli ns. harhapuu.

Kuvassa 16 on esitetty vasemmalla Trimblen pistepilvi liittyen edellä mainittuun harhapuuhun. Oikealla on vastaava näkymä Leican aineistosta. Vasemmalla on merkattuna punaisella algoritmin havaitsemat puunrungot Trimblen aineistosta ja oikealla vihreällä vastaavat havainnot Leican aineistosta. Pisteet sijaitsivat runkokäyrän ylimmässä kohdassa, mutta kuvan havainnollistamiseksi ne on laskettu 2 metrin korkeuteen. Kuten vasemmasta kuvasta nähdään, ei keskimmäisen punaisen pisteen kohdalla ole todellisuudessa puuta. Oikeanpuoleisessa kuvassa algoritmi on kuitenkin löytänyt rungot oikein.

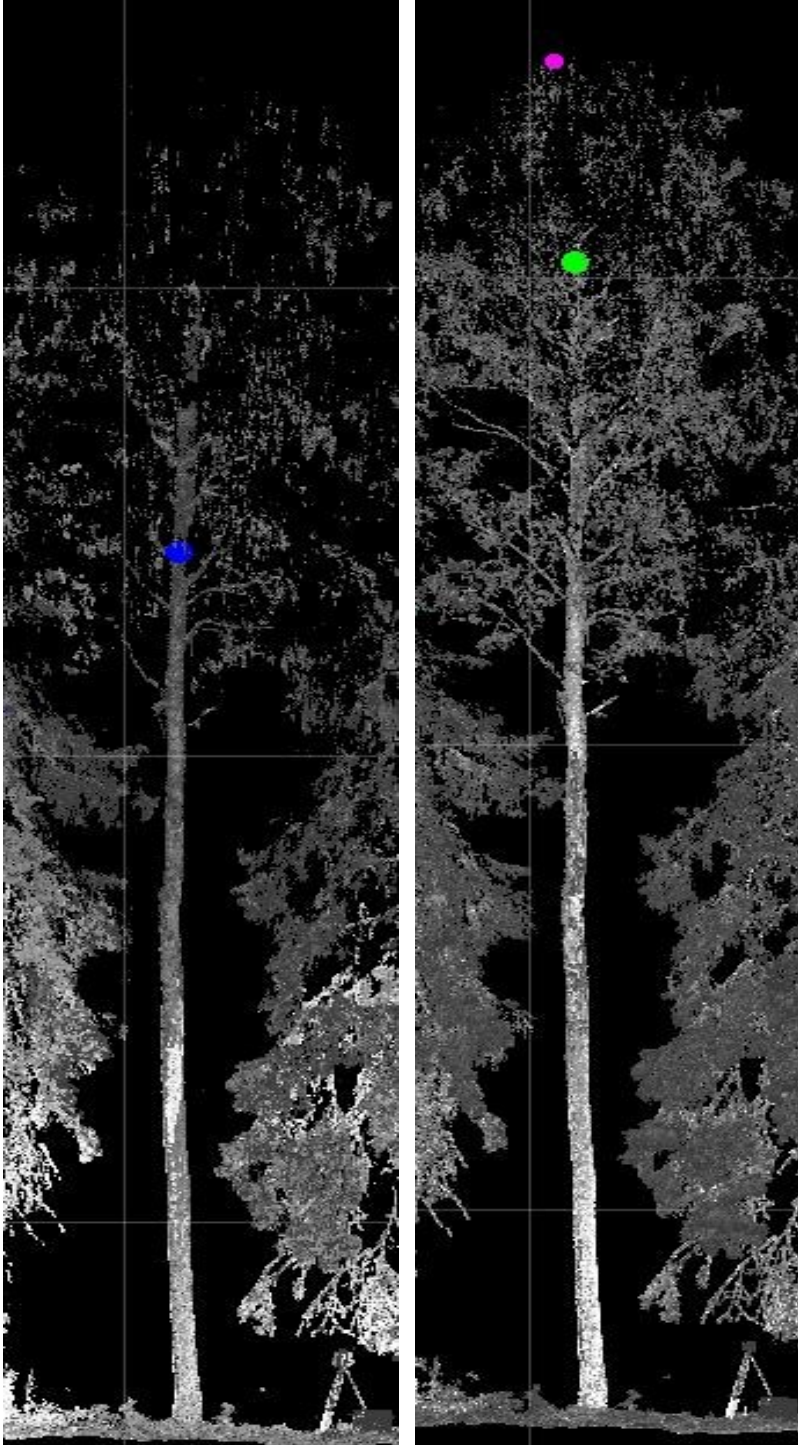
Harhapuu ei tosin selitä täysin taulukon 17 koealan 1048 tulosta, jossa puiden korkein mitattavissa olevan läpimitan keskiarvoksi saatiin noin 20 cm korkeampi keskiarvo Trimblen aineistolle kuin mitä saatiin Leican aineistolle. Vaikka aineistosta löytyikin yksi harhapuu, joka sisällytettiin algoritmin lopputuloksiin, osoittaa taulukko 19 vahvasti sen, että Leican läpäisykyky on parempi verrattuna Trimblen läpäisevyyteen.



Kuva 16: Koeala 1048. Algoritmin löytämät puut punaisella ja vihreällä. Vasemmalla Trimblen aineisto ja oikealla Leican aineisto.

Kaikki edellä tarkastellut tekijät viittaavat vahvasti siihen, että Leican pulssikeilaimen läpäisevyys puustomittauksissa olisi parempi kuin Trimblen vaihe-erokeilaimella. Täytyy myös muistaa, että Trimblen resoluutio oli 6,1 mm/10m ja Leican mittausrésoluutio

6,3mm/10m. Vaikka Trimblen resoluutio olikin aavistuksen verran tarkempi, oli lähes jokainen läpäisevyyteen liittyvä mittaustulos parempi Leicalla tehdyissä mittauksissa. Tämä lopputulos pätee sekä manuaalimittauksissa saaduissa tuloksissa, että algoritmilla saaduissa tuloksissa. Alla on vielä vertailun vuoksi esimerkki siitä, kuinka yksittäinen puu on tutkimusaineistossa näkynyt.



Kuva 17: Koeala 1045. Kahden mittaustekniikan mittaustulokset yhden puun osalta. Vasemmalla Trimblellä saatu pistepilvi ja oikealla Leicalla saatu pistepilvi. Rungossa sijaitsevat sininen ja vihreä merkintä kuvaavat ylintä mitattavissa ollutta runkokäyrää. Vaaleanpunainen piste kuvaa puun korkeutta.

Kuvassa 17 on vasemmalla MS-tilanteessa Trimblellä saatu näkymä yksittäisestä puusta. Sinisellä on merkitty ylin mitattavissa oleva rungon läpimitta. Vaikka runko näyttää kyseisestä kuvakulmasta hieman jatkuvan ylemmäs, ei sinistä pistettä ylempää onnistuttu saamaan rungon läpimittaa mitattua. Tätä puuta ei merkitty kokonaan näkyväksi, koska puun latva ei näkynyt kokonaan. Oikealla vastaavasti on Leicalla saatu näkymä samasta puusta, johon on merkitty vihreällä ylin mitattavissa oleva rungon läpimitta ja vaaleanpunaisella latvan ylin kohta. Kuvapari antaa viitettä siitä, mitkä puut laskettiin kokonaisiksi puiksi ja mitkä ei.

Kuvasta 17 nähdään, kuinka jo mittausvaiheessa oli pääteltävissä, kummalla keilaustekniikalla saadaan parempi läpäisykyky. Viimeistään tulosten yhteydessä saatiin lopullinen varmistus tämän tutkimuksen hypoteesille. Lopputulos oli hypoteesin kannalta sama kaikissa koealoissa vaikeustasosta riippumatta. Kun otetaan huomioon, että hypoteesia oli testattu monipuolisesti eri vaikeustason ja tiheyden omaaville koealoille, voidaan kokonaisuudessaan todeta, että tutkimustulos osoittaa pulssikeilaimen olevan läpäisykyvyltään parempi vaihtoehto verrattuna vaihe-erokeilaimen.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää, miten pulssikeilaimella (ToF) ja vaihe-erokeilaimella (PS) tehtävät puustomittaukset eroavat toisistaan. Eroja tarkasteltiin kolmesta eri näkökulmasta: a) runkojen mitattavuus, b) latvojen näkyvyys sekä c) mitattavissa olevien puiden lukumäärä. Tutkimuksen hypoteesina oli, että pulssikeilaimella olisi teoreettisesti parempi läpäisykyky kuin vaihe-erokeilaimella, kun kyse on puustomittauksista.

Mittaukset toteutettiin Leican pulssikeilaimella ja Trimblen vaihe-erokeilaimella 24:llä koealalla. Jokainen koeala keilattiin molemmilla keilaimilla viidestä kohtaa. Ensimmäinen mitaus suoritettiin koealan keskeltä ja neljä muuta mittausta koealojen kulmilta varmistaakseen mahdollisimman laajan näköalan. Keilauspaikat molemmilla keilaimilla pyrittiin pitämään täysin samoina jokaisessa koealassa. Keilainten mittaasetukset pyrittiin asettamaan mahdollisimman hyvin toisiaan vastaaviksi mittaustarkkuuden osalta (Leica 6,3 mm/10m ja Trimble 6,1 mm/10m). Mitatuista koealoista valittiin kuusi koealaa jatkokäsittelyä varten. Valinta perustui koealan vaikeustasoon. Jokaisesta vaikeustasosta (helppo, keskitaso ja vaikea) valittiin kaksi koealaa. Vaikeustason vaihtelun avulla haluttiin saada kattava ja monipuolinen tulos sekä nähdä, kuinka keilainten välinen ero vaihtelee maastoltaan tiheimpien ja vaikeampien metsien osalta.

Kerätty aineisto esikäsiteltiin keilainvalmistajien tukemilla ohjelmilla, jolloin tarkoitus oli rekisteröidä yhdellä keilaimella mitattujen viiden mittausaseman pistepilvet yhteen. Samalla aineistot georeferoitiin karttakoordinaatistoon. Aineistot luettiin ulos kahdessa osassa: koealan keskeltä tehty keilaus ja viiden keilauksen kokonaisuus. Tällä saatiin verrattua kahta mittaasetelmaa keskenään: yhdestä keilauksesta koostuva SS-mittaus ja useammasta keilauksesta koostuva MS-mittaus. Esikäsitteilyn jälkeen aineistoon tehdyt puustomittaukset toteutettiin manuaalimittausten osalta TerraScanilla MicroStation-ympäristössä. Jokaisesta koealasta etsittiin keilain- ja mittaustapakohtaisesti kaikki mitattavissa olleet kokonaiset puut sekä rinnankorkeuden läpimitaltaan yli 5 cm olevien puiden korkein mitattavissa oleva rungon läpimitta ja runkojen lukumäärä. Aineiston automaattisesta prosessoinnista oli vastuussa Xinlian Liang, joka suoritti mittaukset kehittämällään algoritmilla. Algoritmi etsi aineistosta kaikki mitattavissa olleet puunrungot, rakensi näkyvänä olleiden puunrunkojen perusteella runkokäyriä ja estimoï puiden korkeudet runkokäyrän perusteella. Koska estimoidut puiden korkeudet eivät antaneet viitettä keilainten läpäisevyydestä, jätettiin ne tutkimuksen ulkopuolelle.

Tulokset osoittivat hyvin nopeasti tutkimuksen hypoteesin pitävän paikkaansa. Tarkastelussa olleet osa-alueet olivat manuaalimittauksissa seuraavat: puunrunгон korkein mitattavissa ollut läpimitta, mittauskelpoisten runkojen lukumäärä, kokonaisten puiden korkeudet sekä kokonaisten puiden lukumäärä. Automaattisessa mittauksessa tarkasteltiin havaittujen mittauskelpoisten runkojen lukumäärä ja puunrunгон korkein mitattavissa ollut läpimitta. Jo manuaalimittauksissa oli selvää, että Leican pulssikeilaimen läpäisykyky on Trimblen vaihe-erokeilainta parempi. Liangin algoritmilla saatiin vielä vahvistettua hypoteesia entisestään. Huomioitavaa oli myöskin se, että algoritmilla saadut tulokset olivat objektiivisia, jolloin niihin ei vaikuta ihmisen tekemät subjektiiviset valinnat mittaussvaiheessa.

Pulssikeilaimella saatiin puustomittauksen kannalta huomattavasti parempia tuloksia kuin, mitä saatiin vaihe-erokeilaimella, vaikka Trimblen keilaimen resoluutio olikin aavistuksen verran parempi. Leicalla saatiin SS-tapauksessa keskimäärin 52 % enemmän kokonaisia

puita näkyviin, 10 % enemmän mitattavia runkoja näkyviin sekä mitattua puunrunгон läpimittaa 13 % korkeammalta verrattuna Trimblen tuloksiin. Vastaavat luvut MS-tapauksessa olivat noin 37, 4 ja 10 %. Algoritmin avulla saatiin SS-tapauksessa rungon läpimitta mitattua keskimäärin 6 % korkeammalta Leican aineistosta. Puita havaittiin samassa mittausasetelmassa keskimäärin noin 16 % enemmän Leican aineistosta verrattuna Trimblen avulla saattuihin tuloksiin. Vastaavat luvut MS-tapauksessa olivat noin 3 ja 7 %. Tutkimuksessa havaittiin, että jokaisessa osa-alueessa eroa pulssi- ja vaihe-erokelaimen välillä oli enemmän SS-mittausasetelmassa kuin MS-asetelmassa. MS-tilanteessa mittauksia oli 5, jolloin läpäisevyyden merkitys ei ollut yhtä merkittävä kuin SS-tilanteessa, johon kuului vain yksi mittaus koelalan keskeltä.

Lopuksi voidaan todeta, että vertailluilla laitteilla pulssikeilaimella tehdyt puustomittaukset ovat usean lopputuloksen kannalta parempi vaihtoehto kuin vaihe-erokelaimen, kun kriteerinä on mittausmenetelmän läpäisevyys. Sillä saadaan niin latvuksia kuin puunrunkoa enemmän näkyviin. Lisäksi puunrunkoja havaitaan paremmin. Koska pulssitekniikkaa hyödyntävät TLS-keilaimet ovat viimevuosien kehityksen myötä keventyneet, ovat pulssikeilaimet ehdottomasti parempi vaihtoehto puustomittauksissa. Varsinkin tilanteissa, joissa mittaukset suoritetaan vain yhdellä keilauksella, saavutetaan pulssikeilaimella huomattavasti parempi lopputulos. Etäisyysmittausmenetelmä ei kuitenkaan ole ainoa läpäisevyyteen vaikuttava tekijä puustomittauksissa. Lasersäteen koko ja divergenssi vaikuttavat myös keilainten läpäisykykyyn, jolloin nekin täytyy ottaa huomioon sopivaa keilainta valitessa.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin pääosin kahden keilaustekniikan puustomittauksiin. Tällä hetkellä, kun tiedetään pulssikeilaimen olevan läpäisevyydeltään vaihe-erokelainta parempi puustomittauksissa, on tutkimusta mahdollista laajentaa jatkossa käsittelemään metsäinventointiin liittyviä parametreja. Tällöin voitaisiin verrata vaihe-erokelaimen soveltuvuutta ja kustannustehokkuutta metsäinventoinnissa.

Lähdeluettelo

Alho, P., Hyypä, H., Hyypä, J., Flener, C., Kasvi, E., Vaaja, M. & Kaartinen, H. (2011). Uudet mittausmenetelmät jokiympäristön kartoituksessa. *The Photogrammetric Journal of Finland*. Vol. 22(3). S. 115-127. ISSN 0554-1069.

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*. Vol. 36(Part 8/W2). S. 71-75.

Astrup, R., Ducey, M. J., Granhus, A., Ritter, T., & von Lüpke, N. (2014). Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 44(6). S. 666-676. ISSN 0045-5067

Blais, F., (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*. Vol. 13.1. S. 231-240. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1631921>

Brenner, C., Vosselman, G., & Maas, H. G. (2010). Airborne and Terrestrial Laser Scanning. United Kingdom: Whittles Publishing. S. 336. ISBN 13: 9781904445876

Brolly, G., & Kiraly, G. (2009). Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, Vol 5. S. 119-130.

Cabo, C., Kukko, A., García-Cortés, S., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Ordoñez, C. (2016). An Algorithm for Automatic Road Asphalt Edge Delineation from Mobile Laser Scanner Data Using the Line Clouds Concept. *Remote Sensing*. Vol 8(9). S. 740. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs8090740>

Calders, K., Armston, J., Newnham, G., Herold, M., & Goodwin, N. (2014). Implications of sensor configuration and topography on vertical plant profiles derived from terrestrial LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol 194, S. 104-117. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.022>

Cronvall, T., Kråknäs, P. and Turkka, T. (2012). Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä*. Vol. 41. S. 84. ISSN: 1798-6664.

Crutchley, S. (2009). 12 Using LiDAR in Archaeological Contexts: The English Heritage Experience and Lessons Learned. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, S. 180. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781444311952.ch12>

Douglas, E. S., Martel, J., Li, Z., Howe, G., Hewawasam, K., Marshall, R. A. & Chakrabarti, S. (2015). Finding leaves in the forest: the dual-wavelength Echidna lidar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol 12(4). S. 776-780. Doi: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2014.2361812>

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015), *Global Forest Resources Assessment 2015*. ISBN: 978-92-5-108826-5, Viitattu 8.11.2016, Saatavilla: <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>

- Faro, Laser Scanner Focus3D X 130, The New Powerful X Series Laser Scanner (2014). Viitattu 19.12.2016. Saatavilla: <http://www.laserscanning-europe.com/en/system/files/04REF201-420-EN%20-%20FARO%20Laser%20Scanner%20Focus3D%20X%20130%20Tech%20Sheet.pdf>.
- Goad, C. C. (1991). The Ohio State University highway mapping project: the positioning component. *In Proceedings of the 47th Annual Meeting of The Institute of Navigation*. S. 117-120. Doi: <https://doi.org/10.4271/980855>
- Hauglin, M., Astrup, R., Gobakken, T., & Næsset, E. (2013). Estimating single-tree branch biomass of Norway spruce with terrestrial laser scanning using voxel-based and crown dimension features. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol. 28(5). S. 456-469. Doi: <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.777772>
- Heritage, G., & Large, A. (Eds.). (2009). *Laser scanning for the environmental sciences*. John Wiley & Sons. S. 288. ISBN: 978-1-4051-5717-9.
- Hofton, M. A., Minster, J. B., & Blair, J. B. (2000). Decomposition of laser altimeter waveforms. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 38(4), S. 1989-1996. Doi: <https://doi.org/10.1109/36.851780>
- Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M., 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *Helsingin Yliopiston Metsätieteiden Laitoksen Julkaisuja*, vol. 5 s. 5-20. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/42935>, ISSN 978-952-10-4533-2.
- Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyypä, J., (2014). Yksityiskohtaisen metsävaratiedon tuottaminen – kohti täsmämetsätaloutta?. *Metsätieteen aikakauskirja*, Voil. 4. S. 229-234. Doi: <https://doi.org/10.14214/ma.5883>
- Huang, H., Li, Z., Gong, P., Cheng, X., Clinton, N., Cao, C., & Wang, L. (2011). Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 77(3), S. 219-227. Doi: <https://doi.org/10.14358/pers.77.3.219>
- Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., & Lin, Y. (2010). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), 514-522
- Kaartinen, H. (2014). Kansainväliset kaukokartoituksen testikentät tutkimuksen lähtökohdana. Geodeettinen laitos. Viitattu 4.1.2017. Saatavilla: http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/Paikkatietomarkkinat2014/paikkatietomarkkinat2014_kaukokartoituksen-testikentat_harrikaartinen.pdf.
- Kaasalainen, S., Kukko, A., and Hyypä, H. (2011), Intensiivitetiedon hyödyntäminen laserkeilauksessa, *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, Nro 3/2011. S159-165. Viitattu 7.12.16. https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Kaasalainen_et_al.pdf.

- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyyppä, J., ... & Alho, P. (2013). Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol 75, S. 64-75. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003>
- Kankare, V., Joensuu, M., Vauhkonen, J., Holopainen, M., Tanhuanpää, T., Vastaranta, M., ... & Sipi, M. (2014). Estimation of the timber quality of scots pine with terrestrial laser scanning. *Forests*. Vol 5(8). S. 1879-1895. Doi: <http://dx.doi.org/10.3390/f5081879>
- Kankare, V., Liang, X., Vastaranta, M., Yu, X., Holopainen, M., & Hyyppä, J. (2015). Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol 108, S. 161-171. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007>
- Kukko, A. (2013). Mobile Laser Scanning–System development, performance and applications. *Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisu n:o 153*. Väitöskirja. Aalto Yliopisto. S. 247
ISSN: 0085-6932. ISBN: 978-951-711-307-6. Saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789517113076/isbn9789517113076.pdf>
- Kukko, A., Kaartinen, H., Hyyppä, J., & Chen, Y. (2012). Multiplatform mobile laser scanning: Usability and performance. *Sensors*, Vol. 12(9), S. 11712-11733. Doi: <https://doi.org/10.3390/s120911712>
- Krabill, W. B., Collins, J. G., Link, L. E., Swift, R. N., & Butler, M. L. (1984). Airborne laser topographic mapping results. United States: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. ISSN 0099-1112.
- Krabill, W. G. (1989). GPS application to laser profiling and laser scanning for digital terrain models. In *Proceedings of 42nd Photogrammetric Week, Stuttgart*. S. 329-340.
- Leica ScanStation P30/P40 (2015a). Product specifications. Viitatti 15.12.2016. Saatavilla: http://www.smartgeometrics.com/wp-content/uploads/2015/05/Leica_ScanStation_P30-P40.pdf.
- Leica ScanStation P30/P40 (2015b). User Manual. Viitattu 12.12.2016. Saatavilla: <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/457/>.
- Liang, X., Litkey, P., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M., & Holopainen, M. (2012a). Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 50(2). S. 661-670. Doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2011.2161613>
- Liang, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Holopainen, M., & Melkas, T. (2012b). Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. Vol 1(3), S. 242-255. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi1030242>
- Liang, X. (2013). Feasibility of Terrestrial Laser Scanning for Plotwise Forest Inventories. *Suomen Geodeettisen laitoksen julkaisu n:o 149*. Väitöskirja. Aalto Yliopisto. S. 150. ISSN:

0085-6932. ISBN: 978-951-711-299-4. Saatavilla:
<http://lib.tkk.fi/Diss/2013/isbn9789517112994/isbn9789517112994.pdf>

Liang, X., & Hyypä, J. (2013). Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors*. Vol 13(2), S. 1614-1634. Doi: <https://doi.org/10.3390/s130201614>

Liang, X., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Jaakkola, A., & Wang, Y. (2014a). Possibilities of a personal laser scanning system for forest mapping and ecosystem services. *Sensors*. Vol. 14(1), S. 1228-1248. Doi: <https://doi.org/10.3390/s140101228>

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*, Vol. 52(3), S. 1739-1748. Doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2253783>

Liang, X., Wang, Y., Jaakkola, A., Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., ... & Liu, J. (2015). Forest data collection using terrestrial image-based point clouds from a handheld camera compared to terrestrial and personal laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53(9), S. 5117-5132. Doi: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2015.2417316>

Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H. & Holopainen, M. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol 115, S. 63-77. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>

Lindberg, E., Holmgren, J., Olofsson, K., & Olsson, H. (2012). Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research*, Vol 131(6), S. 1917-1931. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0642-5>

Liu, J., Hyypä, J., Yu, X., Jaakkola, A., Liang, X., Kaartinen, H., ... & Hyypä, H. (2016). Can global navigation satellite system signals reveal the ecological attributes of forests?. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 50, S. 74-79. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.007>

Maas, H. G., Bienert, A., Scheller, S., & Keane, E. (2008). Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International journal of remote sensing*, Vol 29(5), S. 1579-1593. Doi: <https://doi.org/10.1080/01431160701736406>

Maltamo, M., Packalén, P., Uutera, J., Ärölä, E., & Heikkilä, J. (2008). Laserkeilaustulkinnan hyödyntäminen metsäsuunnittelun tietolähteenä. *Metsätieteen aikakauskirja*, Vol 4/2008, S. 304-309. Doi: <https://doi.org/10.14214/ma.6834>

Mengesha, T., Hawkins, M., & Nieuwenhuis, M. (2015). Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *European Journal of Forest Research*, Vol 134(2), S. 211-222. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0844-0>

- Merlo, A., Dalcò, L., & Fantini, F. (2012). Game engine for Cultural Heritage: New opportunities in the relation between simplified models and database. *Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on*. S. 623-628. Doi: <https://doi.org/10.1109/vsmm.2012.6365993>
- Moskal, L. M., & Zheng, G. (2011). Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning (TLS) in urban heterogeneous forest. *Remote Sensing*. Vol 4(1), S. 1-20. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs4010001>
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., ... & Söderman, U. (2004). Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol 19(6). S. 482-499. Doi: <https://doi.org/10.1080/02827580410019553>
- Olofsson, K., Holmgren, J., & Olsson, H. (2014). Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the ransac algorithm. *Remote Sensing*. Vol 6(5), S. 4323-4344. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs6054323>
- Overby, J., Bodum, L., Kjems, E., & Iisoe, P. M. (2004). Automatic 3D building reconstruction from airborne laser scanning and cadastral data using Hough transform. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 35(B3), S. 296-301.
- Overton, I., Siggins, A., Gallant, J. C., Penton, D., & Byrne, G. (2009). 14 Flood Modelling and Vegetation Mapping in Large River Systems. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. S. 220. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781444311952.ch14>
- Pirotti, F., Guarnieri, A., & Vettore, A. (2013). Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol 76, S. 56-63. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.08.003>
- Pueschel, P., Newnham, G., Rock, G., Udelhoven, T., Werner, W., & Hill, J. (2013). The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol 77. S. 44-56. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.001>
- Puttonen, E., Hakala, T., Nevalainen, O., Kaasalainen, S., Krooks, A., Karjalainen, M., & Anttila, K. (2015). Artificial target detection with a hyperspectral LiDAR over 26-h measurement. *Optical Engineering*. Vol 54(1). S. 013105-013105. Doi: <https://doi.org/10.1117/1.oe.54.1.013105>
- Pölönen, I. (2013). Discovering knowledge in various applications with a novel hyperspectral imager. Viitattu: 12.01.2016. ISBN: 978-951-39-5538-0 Saatavilla: <https://jyx.jyu.fi/dspace/handle/123456789/42612>
- Seitz, P. (2007). Photon-noise limited distance resolution of optical metrology methods. *Optical Metrology*. International Society for Optics and Photonics. S. 66160D-66160D. Doi: <https://doi.org/10.1117/12.732040>

Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2008). Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. CRC press. ISBN: 978-1-4200-5143-8. Doi: <https://doi.org/10.1201/9781420051438>

Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H., & Thies, M. (2003). Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. *Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*- Vol. 2003. S. 252-258. Viitattu: 21.11.2016. Saatavilla: http://www.natscan.uni-freiburg.de/suite/pdf/030916_1642_1.pdf

Srinivasan, S., Popescu, S. C., Eriksson, M., Sheridan, R. D., & Ku, N. W. (2014). Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *Forest Ecology and Management*. Vol 318. S. 304-317. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.038>

Skolnik, M. I. (1970). Radar handbook. McGraw-Hill Education. S. 1328. ISBN-13: 978-0071485470.

Strahler, A. H., Jupp, D. L., Woodcock, C. E., Schaaf, C. B., Yao, T., Zhao, F., ... & Ni-Miester, W. (2008). Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol 34(sup2). S. S426-S440. Doi: <https://doi.org/10.5589/m08-046>

Trimble TX5 Scanner (2012). Datasheet. Viitattu: 20.12.2016. Saatavilla: http://mep.trimble.com/sites/mep.trimble.com/files/marketing_material/Datasheet-TX5_scanner.pdf

Trimble TX5 (2012). 3D laser scanner. User guide. Viitattu: 21.12.2016. Saatavilla: <http://mep.trimble.com/sites/mep.trimble.com/files/Trimble%20TX5%20User%20Guide.pdf>

Ussyshkin, V. (2009). Mobile laser scanning technology for surveying application: from data collection to end-products. *FIG Working Week*. Viitattu: 26.10.2016. Saatavilla: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2009/papers/ts08e/ts08e_ussyshkin_3521.pdf

Vastaranta, M., Holopainen, M., Kaartinen, H., Hyyppä, H. & Hyyppä, J. (2009). Uudistuneet metsien maastomittaustarpeet. *Metsätieteen aikakauskirja*. Vol 4. S. 370-374. Doi: <https://doi.org/10.14214/ma.6339>

Vosselman, G., & Maas, H. G. (Eds.). (2010). Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing. S. 336. ISBN-13: 978-1904445-87-6.

Yu, X., Liang, X., Hyyppä, J., Kankare, V., Vastaranta, M., & Holopainen, M. (2013). Stem biomass estimation based on stem reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds. *Remote sensing letters*. Vol 4(4). S. 344-353. Doi: <https://doi.org/10.1080/2150704x.2012.734931>

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., & Studnicka, N. (2006). Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser

scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol 60(2). S. 100-112. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001>

Walsh, E. J., Hancock III, D. W., Hines, D. E., & Kenney, J. E. (1984). Electromagnetic bias of 36-GHZ radar altimeter measurements of MSL. *Marine Geodesy*. Vol 8(1-4). S. 265-296. Doi: <https://doi.org/10.1080/15210608409379506>

Wang, W., Zhao, W., Huang, L., Vimarlund, V., & Wang, Z. (2014). Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Vol 1(5). S. 325-337. Doi: [https://doi.org/10.1016/s2095-7564\(15\)30279-8](https://doi.org/10.1016/s2095-7564(15)30279-8)

Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol 54.2. S. 68-82. Doi: 10.1016/S0924-2716(99)00011-8

Zhang, S., Wang, C., Yang, Z., Chen, Y., & Li, J. (2016). Automatic railway power line extraction using mobile laser scanning data. *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol XLI-B5. S. 615-619. Doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b5-615-2016>