

VTT Technical Research Centre of Finland

Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina

Raitila, Jyrki; Ahola, Jari M.; Virkkunen, Matti; Sipola, Teemu; Riihimäki, Henri; Tenhunen, Jussi

Published: 29/03/2021

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Raitila, J., Ahola, J. M., Virkkunen, M., Sipola, T., Riihimäki, H., & Tenhunen, J. (2021). *Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tutkimusraportti No. VTT-R-00010-21



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

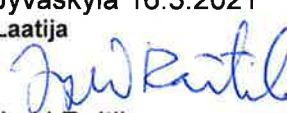


This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina

Kirjoittajat: Jyrki Raitila (VTT), Jari Ahola (VTT), Matti Virkkunen (VTT),
Teemu Sipola (VTT), Henri Riihimäki (Silvere), Jussi Tenhunen
(VTT)

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Kestävää kasvua ja työtä 2014 - 2020 Suomen rakennerahasto-ohjelma Keski-Suomen liitto / Hilka Laine Cygnaeuksenkatu 1, 40100 Jkl	Asiakkaan viite Hankekoodi: A73740	
Projektin nimi Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina	Projektin numero/lyhytnimi 117120 DigInventory	
Raportin laatija(t) Raitila, J., Ahola, J., Virkkunen, M. ...Tenhunen, J.	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 70/1	
Avainsanat Metsänarviointi, laserkeilaus, LiDAR, SPAD, yksifotonilaskenta	Raportin numero VTT-R-00010-21	
Tiivistelmä <p>Metsänarvioinnissa käytettävät puustotiedot on saatu perinteisesti maastossa mitattujen otantakoealojen avulla estimoimalla. Nykyisin maastomittausten tueksi on otettu myös laajojen alueiden laserkeilausta. Kummankin menetelmän puutteena on puustokartan ja tarkan puukohtaisen tiedon puuttuminen. Tarkat puukartat mahdollistavat hakkuun paremman suunnittelun ja puukohtaiset laatutietueet edelleen katkonnan optimoinnin ja hakkuusaantojen tarkemman arvioinnin. Lisäksi niiden avulla voidaan tehostaa metsänhoitoa ja saada kustannussäästöjä puunhankinnassa.</p> <p>Hankkeen keskeisimpiä tutkimustehtäviä oli etsiä ja arvioida edullisia laserkeilausvälineitä ja -menetelmiä sekä tunnistaa tekniikan kehitystrendejä. Edelleen pyrkimyksenä oli tutkia uusia mittaustekniikoita, kuten yksifotonilaskentaan (single photon counting) perustuva laseretäisyysmittausta, jolla kyetään näkemään merkittävästi paremmin peitteiden taakse jääviä rungon osia ja erottamaan syvyysuunnassa lähekkäin olevia kohteita toisistaan. Leimikkotason mittauksissa suurin mielenkiinto oli kaupallisen keilaimen, 3D LiDAR ZEB Horizonin, ja VTT:n SPADin vertailussa. Molempien tarkkuus rungon läpimitan mittauksessa oli oletetulla tasolla eroten tyypillisesti 1-3 cm mittasaksimittauksista. Tiedossa ei ole, että yksifotonilaskentaan perustuvaa laserkeilainta olisi aikaisemmin käytetty puustotunnusten määrittämiseen maasto-olosuhteissa. Mittaukset osoittivat, että SPAD LiDAR:illa on erinomaiset mahdollisuudet tuottaa tarkempaa tietoa yksittäisistä puista verrattuna tavanomaiseen LiDAR:iin, varsinkin peitteisessä maastossa. Lisää tutkimusta ja uusia innovaatioita kuitenkin tarvitaan mittaussuorituksen lisäämiseksi.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Jyväskylä 16.3.2021 Laatija  Jyrki Raitila, Senior Scientist	Tarkastaja  Tapio Heikkilä Team Leader (BA2D02)	Hyväksyjä  Jouni Hämäläinen Team Leader (BA3601)
VTT:n yhteystiedot PL 1603, 40401 Jkl		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaaja, VTT ja ohjausryhmä		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Alkusanat

Tutkimusraportissa on kuvattu keskeiset tutkimustehtävät ja koottu niiden tulokset projektista nimeltä *'Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina (DigilInventory)'*. Hanke toteutettiin vuosina 2018-2021 Keski-Suomessa ja sen päärahoitus tuli Euroopan aluekehitysrahastolta (EAKR) Kestävää kasvua ja työtä 2014-2020 Suomen rakennerahasto-ohjelmasta. Muina rahoittajina toimivat VTT, Tieto Oyj, Senop Oy, Noptel Oy, Valmet Oyj ja Arbonaut Oy.

Projektin toteutuksesta ja raportoinnista vastasivat VTT:n tutkijat Jyväskylästä ja Oulusta. Käytännön yhteistyötä kenttätöissä ja niiden raportoinneissa tehtiin PreFor Oy:n, Luavia Oy:n ja Geotrim Oy:n kanssa. Lisäksi muuta arvokasta asiantuntija-apua saatiin mukana olevilta yrityksiltä sekä Metsäkeskukselta, Metsäteholta ja metsänhoitoyhdistys Keski-Suomelta.

Ohjausryhmässä toimivat Jaakko Kuusisaari/Juha Malinen (Tieto), Janne Koivuniemi (Valmet), Jussi Peuhkurinen (Arbonaut), Juha Leskinen (Noptel), Juho Heikkilä (Suomen metsäkeskus), Jussi Linnala (metsänhoitoyhdistys Keski-Suomi), Tapio Räsänen/Jukka Malinen (Metsäteho), Jyrki Saloniemi (Luavia), Hilikka Laine (Keski-Suomen liitto), Jyrki Raitila (VTT) ja Matti Virkkunen (VTT).

Raportissa kuvattuun tutkimukseen osallistuivat VTT:ltä erikoistutkija Jyrki Raitila, joka toimi myös projektin koordinaattorina, erikoistutkijat Matti Virkkunen ja Jussi Tenhunen, tutkijat Teemu Sipola, Jari Ahola, Mikko Lappalainen sekä tutkimusinsinööri Matti Annala. Lisäksi tiimipäällikkö Tapio Heikkilältä saatiin arvokasta näkemystä erilaisten mittalaitteiden soveltamisesta ja tulosten julkaisemisesta.

Esitämme parhaat kiitokset rahoittajille, mukana olleille yrityksille, ohjausryhmän jäsenille ja kaikille muille työhön osallistuneille.

Jyväskylä 26.3.2021

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
Sisällysluettelo.....	3
1. Johdanto.....	5
1.1 Tarve.....	5
1.2 Uutuus- ja lisäarvo.....	6
2. Tavoite.....	7
3. Katsaus nykytilanteeseen.....	8
3.1 Kaukokartoitukseen perustuvan metsänarvioinnin nykytila.....	8
3.1.1 Yleistä.....	8
3.1.2 Lentolaserkeilaus.....	8
3.1.3 Maastolaserkeilaus.....	9
3.1.4 Metsävaratiedon keruu käytännössä.....	11
3.2 Tutkimuksen nykytila.....	13
3.3 Optiset etäisyysmittausteknologiat.....	16
3.3.1 Edulliset, konenäköön, kuluttajatuotteisiin tarkoitettut 3D-kvantavat CMOS kamerapohjaiset tekniikat.....	16
3.3.2 Lineaariseen elektroniseen signaalinkäsittelyyn perustuvat, pistemäisellä mittauspisteellä 3D-keilaavat LiDAR-laitteet.....	16
3.3.3 Yksifotonilaskentaan perustuva LiDAR-tekniikka.....	17
3.4 Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet.....	18
4. Rajaukset.....	19
5. Maastomittausten menetelmät ja kohteet.....	19
5.1 Kohteet.....	19
5.2 Pystymittaus.....	20
5.3 Trestima.....	21
5.4 Silvere.....	22
5.5 GeoSLAM maastokeilain.....	23
5.6 Hakkuukoneiden keräämät mittaustiedot.....	25
5.7 Metsäkeskuksen yksityismetsien metsävaratieto.....	25
5.8 Koepuut.....	26
6. Optinen puiden mittaus.....	26
6.1 Tutkimusympäristö, mittauskohdeet ja menetelmät.....	26
7. Tulokset ja niiden tarkastelu.....	31
7.1 Maastomittaustulosten vertailu.....	31
7.1.1 Koeleimikot.....	31
7.1.2 Saarijärven leimikon koepuut.....	35
7.1.3 3D-mittalaitteiden vertailu.....	39
7.1.4 Rinnankorkeusläpimitan ja lenkouden määrittäminen.....	43
7.1.5 Peitteisten koepuiden mittaaminen ja läpimitan määrittäminen.....	46
8. Johtopäätökset.....	55

9. Yhteenveto	55
9.1 Tausta ja tavoite	55
9.2 Maastomittaus: toteutus ja tulokset	56
9.3 Puiden optinen mittaus: toteutus ja tulokset	57
9.4 Johtopäätökset.....	58
Lähdeviitteet	59

1. Johdanto

1.1 Tarve

Metsänarvioinnissa käytettävät puustotiedot on saatu perinteisesti maastossa mitattujen otantakoelajien avulla estimoimalla (Xie ym. 2020). Nykyisin maastomittausten tueksi on otettu myös laajojen alueiden laserkeilausta (Hyyppä & Inkinen 1999, Holopainen ym. 2013). Kummankin menetelmän puutteena on puustokartan ja tarkan puukohtaisen tiedon puuttuminen. Lisäksi maastotyö on kallista. Tarkat puukartat mahdollistavat hakkuun paremman suunnittelun ja puukohtaiset laatutietueet katkonnan optimoinnin ja hakkuusaantojen tarkemman arvioinnin. Lisäksi niiden avulla voidaan tehostaa metsänhoitoa ja saada kustannussäästöjä puunhankinnassa (Kangas ym. 2019).

Nykytilanteessa korjuukoneen kuljettaja joutuu tekemään hakattavan puun valinnan ja katkonnan silmämääräisesti, usein hankalissa sääolosuhteissa, nähden rungon vain yhdestä suunnasta, jolloin esimerkiksi katselusuuntaisen puun lenkouden arviointi on hankalaa. Puun ostaja ja myyjä eivät tarkkaan tiedä, millaisia runkoja korjattavassa leimikossa on ja kauppa ratkaistaan ostotarjouksissa annettujen kuutiohintojen perusteella. Ennakkotieto antaa vain keskimääräisiä lukuja, muttei juurikaan laadullisia tunnuksia. Kun arviot eri puutavaralajien osuuksista eivät ole sitovia, eri puunostajien käyttämät säännöt ja myös käytännöt katkontaan/apteeraukseen ovat erilaisia, kaupan taloudellinen optimointi sekä puunmyyjän että metsän ostajan kannalta on epätäydellistä.

Koska puuta myydään vuosittain koko Suomessa yli kahdella miljardilla eurolla, voidaan kaupankäyntiä digitalisoimalla saavuttaa suuria taloudellisia etuja (Luonnonvarakeskus 2020). Tämä digitalisointi vaatii uusia mittaustekniikoita. Metsänomistaja ei välttämättä tiedä metsänsä tarkkaa arvoa puukauppatilanteissa, eikä pysty kovin helposti arvioimaan metsänkäsittelyn visuaalisia ja taloudellisia vaikutuksia.

Puun apteerauksen kannalta lentolaserkeilaus (Airborne Laser Scanning, ALS) ei kykene tuottamaan tarvittavaa, millimetriluokan mittatarkkuutta, sillä latvusto peittää puun tyviosan haitaten sen suoraa mittausta (Xie ym. 2020, Ghimire ym. 2017). Kolmijalalta tapahtuva maastolaserkeilaus (Terrestrial Laser Scanning, TLS) ylittää millimetriluokan tarkkuuteen, mutta mittausnopeus ja tuottavuus jää alhaiseksi (Kankare ym. 2014). Uudentyyppiset liikkuvat laserkeilaimet (Mobile Laser Scanning, MLS) nostavat maan pinnalla tapahtuvan keilauksen tuottavuutta, mutta mittaustarkkuus ei ole yhtä hyvä kuin kolmijalalta tapahtuvassa keilauksessa (Kankare ym. 2015). Jotta puunkorjuussa voidaan käyttää korjuukoneen apuna laserkeilausta, täytyy löytää tarkempia mittaustekniikoita sekä suorituskykyisen tekniikan uusia, aiempaa nopeampia ja edullisempia toteutustapoja. On myös mahdollista suorittaa metsän ”digitaalinen apteeraus” etukäteen käyttämällä tähän tarkoitukseen dataa, joka on hankittu ennen hakkuuta tarkemmalla ja kalliimmalla mittaustekniikalla ja integroida osaksi metsäkonetta halvempaa laserkeilaustekniikkaa käytettäväksi koneen, hakkuupään ja puuston keskinäiseen paikantamiseen.

Hankkeen valmistelun lähtökohtana on ollut uusimman tiedon ja näkemysten sekä viimeaikaisen 3D-mittaustekniikassa tapahtuneen teknisen kehityksen hyödyntäminen metsänomistuksen, metsien käytön ja lisääntyvän puunkorjuun muutoksissa. Puun laatua on mahdollista arvioida myös eri mallintamismenetelillä, mutta tämän hankkeen fokus oli pääasiassa mittaustekniikassa, ei mallinnusmenetelmissä. Puunkorjuun kasvavien haasteiden ja alueellisen lisääntyvän kysynnän takia on ensiarvoisen tärkeää löytää uusia kustannustehokkaita ja innovatiivisia ratkaisuja eri prioriteettien tyydyttämiseksi ja taloudellisuuden parantamiseksi. Hanketta valmisteltiin yhdessä Keski-Suomessa merkittävässä roolissa olevien yritysten ja toimijoiden kanssa sekä huomioitiin mahdollisuudet tuleville uusille yrityksille (esim. metsäpalveluyritykset) liiketoimintamallien edistämiseksi.

1.2 Uutuus- ja lisäarvo

Maastolaserkeilaimia ei ole vielä juurikaan hyödynnetty käytännön metsien arvioinnissa, puukaupan eikä hakkuun apuna. Maastolaserkeilaimen ja lennokkilaserkeilauksen käyttö yhdessä tarkentaa ja nopeuttaa metsänarviointia, auttaa leimikkosuunnittelussa ja mahdollistaa metsikön tarkan visualisoinnin.

Ajatus hakkuuta edeltävän, kalliimpaa laitetekniikkaa vaativan millimetritarkkuuden omaavan laserkeilauksen yhdistämisestä harvesteriin sijoitettavaan senttimetriluokan tarkkuuteen yltävään, reaaliaikaiseen laserkeilaimen on uusi. Näiden kahden datan reaaliaikainen yhdistämien mahdollistaa mullistavan edistysaskelen harvesterin ohjauksessa digitaalisen, ennakoivan apterauksen ja nosturin käytön automatisoinnin. Yksifotonilaskentaan perustuvaa laserkeilausta ei ole aikaisemmin sovellettu puiden laatuparametrien, kuten runkojen rinnankorkeusläpimittojen ja lenkouden, mittaamiseen leimikon pystypuista.

Muutokset metsässä, muun muassa hakkuuehdotukset, voitaisiin kuvata virtuaalisesti. Tarkempi tieto yksittäisistä rungoista ja runkojen sijainnista palstalla helpottaisi merkittävästi korjuukoneen kuljettajaa hakattavan puun valinnassa ja katkonnassa. Kehittämällä ja soveltamalla keilausteknologiaa, korjuun apuvälineeksi sopivat laitteet saadaan edullisemmaksi, jolloin niitä kannattaa asentaa korjuukoneisiin. Metsäkaupat voitaisiin tehdä entistä tarkemman ja luotettavan puuston arvon määrittämisen perusteella. Puun ostaja saisi entistä tarkemmin etukäteen tietää, millaisia runkoja metsästä saadaan ja kykenisi projisoimaan tarjolla olevaa puustoa oman tuotantonsa ja myyntinsä vaatimaa materiaalityyppiä vasten. Puiden apteraukseen (katkontaan) saisi laskennallisia apuvälineitä, jolloin se ei jäisi pelkästään konekuljettajan arvioinnin varaan. Kaikki tieto voitaisiin kerätä pilvipalveluun, josta se voidaan helposti jakaa eri käyttäjäryhmille. Pitkällä aikajänteellä tässä nähdään mahdollisuudet digitaaliseen liiketoimintaan, jossa tuottoja saadaan mittausdatan käyttöoikeuksista.

2. Tavoite

Laserkeilauksen ja drone-tekniikan yhdistelmällä saadaan karkeampaa dataa laajemman puuston arviointiin, mutta teknologiaa kehittämällä on mahdollisuuksia siirtyä huomattavasti tarkempaan puu- ja runkokohtaiseen puun mittaamiseen ja puun laadun arviointiin tavoitteena tarkan tiedon tuottaminen kohtuuhintaan.

Hankkeessa oli tarkoitus analysoida esteitä kuten laitteen liikuteltavuus ja metsän peitteisyys, jotka rajoittavat nykyisten olemassa olevien tarkkojen laserkeilaimien käyttöä metsän puuston keilauksessa ja siksi pyrittiin löytämään keinoja näiden esteiden kiertämiseksi. Tavoitteena oli myös analysoida virhelähteitä, jotka vaikuttavat nykyisten maastolaserkeilaimien (esim. GeoSLAM Zeb Horizon) mittaustarkkuuteen (esim. laser etäisyysmittauksen kohina ja kohteiden heijastavuuksien muutoksista johtuva systemaattinen etäisyysmittausvirhe eli walk virhe sekä laserkeilaimen oman aseman epävarmuus) ja hakea ratkaisuja, joilla näitä tekijöitä voidaan ratkaisevasti vähentää. Edelleen tavoitteena oli tutkia uusia mittaustekniikoita, kuten yksifotonilaskentaa (single photon counting) perustuvaa laseretäisyysmittausta, jolla kyetään näkemään merkittävästi paremmin peitteiden taakse jääviä rungon osia ja erottamaan syvyysuunnassa lähekkäin olevia kohteita toisistaan.

Hankkeessa pyrittiin löytämään uusia teknologiavauksia metsäpuolelle, mutta myös muuta suomalaista elinkeinoelämää varten, esim. puolustustarviketeollisuudessa ja suomalaisessa erikoisajoneuvoteollisuudessa (esim. kaivosajoneuvot) hyödynnettäväksi.

Hankkeen keskeisimmät tavoitteet määriteltiin seuraavasti:

- Etsiä ja arvioida edullisia laserkeilausvälineitä sekä tunnistaa tekniikan kehitystrendejä, jotka mahdollistavat tarkemman, nopeamman ja taloudellisemman puu- (yksittäiset puut) ja puustotunnusten mittaamisen ja niiden avulla tapahtuvan metsikön (leimikon) arvioinnin.
- Selvittää keveiden laserkeilainten soveltumista puunkorjuun apuvälineeksi. Pitkän ajan tavoite on, että harvesterin suorittama apteeraus automatisoidaan mm-luokan laserkeilausdatan pohjalta ja harvesterin paikoitus suhteessa ympäröivään metsään, sekä sen nosturin ohjaus automatisoidaan vertaamalla cm-luokan laserkeilauksen tuottamaa reaaliaikaista dataa aiemmin mitattuun mm-luokan dataan.
- Tutkia dronen ja laserkeilauksen yhdistämistä ja niiden mahdollisia sovelluksia sekä datan keräämistä eri intressiryhmien käytettäväksi (pilvipalvelut). Tavoitteena on digitaalinen metsävaratieto.
- Kehittää yhdessä yrittäjien kanssa laserkeilauksen ja esimerkiksi dronen käytön palvelukonsepteja.
- Viestiä aktiivisesti hankkeen mahdollisuuksista ja jalkauttaa saatua tutkimustietoa konkreettisesti yrityksiin, jotka ovat potentiaalisia toimijoita näillä liiketoiminta-alueilla.

3. Katsaus nykytilanteeseen

3.1 Kaukokartoitukseen perustuvan metsänarvioinnin nykytila

3.1.1 Yleistä

Metsiä inventoidaan laajojen alueiden strategista suunnittelua varten sekä operatiivisen metsä- ja leimikkosuunnittelun tarpeisiin. Suomen valtakunnan metsien inventointi (VMI) on esimerkki strategiseen suunnitteluun tarkoitettuun inventointiin (Tomppo ym. 2011). VMI:n avulla seurataan valtakunnan tasolla mm. metsämaan ja puuston määrän kehitystä, puuston kokonaiskasvun muutoksia, puustoon sitoutuneen biomassan määrää ja metsien hiilitasetta sekä suuralueen hakkuumahdollisuuksia. Strategiseen suunnitteluun tarkoitettuun inventointiin tärkeää on tiedon harhattomuus sekä se, että pienetkin ositteet eivät katoa tiedonkeruussa. (Holopainen ym. 2013)

Operatiivisessa metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tavoitteena on metsäalueen hakkuumahdollisuuksien, hakkuukertymän ja toimenpiteiden kartoitus. Kuvioittaisen arvioinnin perusteella laaditaan metsänomistajalle suunnitelma päätöksenteon tueksi. Metsää kuvaavan tiedon tulee olla kuviotasolla mahdollisimman tarkkaa ja harhatonta, jotta metsää koskevat hoito- ja hakkuutoimet voidaan tehdä oikein ja ajallaan. Puustotietojen lisäksi metsäsuunnittelussa tarvitaan kasvupaikkojen luokitusta metsikön puuntuotoskyvyn kuvaukseen, metsänkäsittelytoimenpiteiden valintaan sekä suojele- ja virkistysarvojen määrittämiseen. Metsiköiden puuntuotoskyky on puolestaan yksi ratkaisevista tunnuksista määrittäessä metsäkiinteistön metsätaloudellista tuottoarvoa. (Holopainen ym. 2013, Kangas ym. 2019, Kangas & Packalen, 2018)

Operatiivista leimikkosuunnittelua tehdään puunhankinnan ohjausta varten, jotta puunostaja saisi haluamiansa puutavaralajeja oikeaan aikaan. Tällöin tarvitaan yksityiskohtaista tietoa leimikon puutavaralajien määrästä sekä runkojen laadusta. Operatiivisessa leimikkosuunnittelussa tiedon harhattomuuden vaatimuksesta voidaan jossakin määrin tinkiä, mutta tieto metsäsuunnittelukuvion sisäisestä vaihtelusta mikrokuvio- tai jopa puutasolla olisi arvokasta. Metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tarkkuus ei ole riittävä leimikkosuunnitteluun tarpeisiin, vaan se tehdään erillisenä maastoinventointina. (Holopainen ym. 2013, Haara & Korhonen 2004)

Metsiin liittyvää tietoa voidaan kerätä kaukokartoituksen avulla monella tasolla. Kartoitus on mahdollista tehdä koskien yksittäisiä puita, tietyn suuruisia ja muotoisia koealoja, metsikkökuvioita, metsätiloja tai suurempia metsäalueita. Kaukokartoitusta on perinteisesti käytetty apuna sekä kuvioittaisessa arvioinnissa että otantapohjaisessa koeala-arvioinnissa. Uusin teknologia mahdollistaa myös puukohtaiset mittaukset. Kaukokartoitustietoa voidaan käyttää pää- tai lisätietolähteenä metsäsuunnittelun ja metsien inventoinnin lisäksi puunhankinnan strategisessa ja operatiivisessa suunnittelussa, puunkorjuussa ja kuljetuksessa, kiinteistöjen hallinnassa sekä metsänhoitotöiden suunnittelussa ja seurannassa. Koko maan (tai osavaltion) kattavia keilauksia on tehty tai ollaan tekemässä ainakin Suomessa, Ruotsissa, Hollannissa, Saksassa, Itävallassa, Sveitsissä ja USA:ssa. (Holopainen ym. 2013, Kangas ym. 2019)

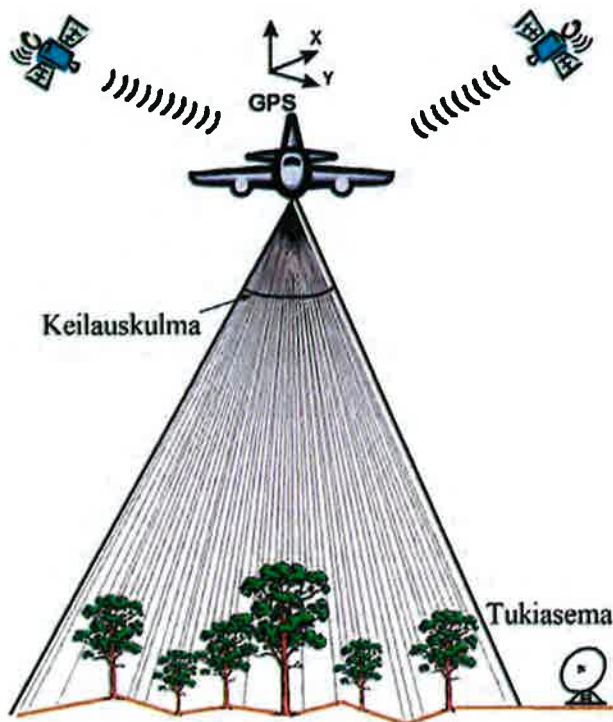
3.1.2 Lentolaserkeilaus

1990-luvun alkupuolelta lähtien on kehitetty menetelmiä numeeristen ilmakuvien hyödyntämiseen metsien inventoinnissa. Tavoitteena on ollut siirtyä operatiivisessa metsäsuunnittelussa visuaalisesta kuvatulkinnasta automaattiseen tai puoliautomaattiseen tulkintaan tai kuvamittaukseen joko kuvio- tai puutasolla. Ainoastaan 3D-menetelmillä voidaan

päästä operatiivisen metsäsuunnittelun vaatimalle tarkkuustasolle. Suurena haasteena on maanpinnan huono näkyvyys, jonka ratkaisuksi on kehitetty ilmasta tapahtuva lentolaserkeilaus. Se on mullistanut sekä rakennetun ympäristön että luonnonvarojen mittauksen (Kuva 1). (Vastaranta ym. 2011, Holopainen ym. 2013)

Useat tutkimukset ovat osoittaneet että niin kuviokohtaisten puustotunnusten arvioinnissa (mm. Næsset 1997a,b, 2002, Packalén & Maltamo 2007, Peuhkurinen ym. 2007, Holopainen ym. 2010b) kuin yksittäisten puiden tunnusten mittaamisessa (mm. Hyyppä & Inkinen 1999, Hyyppä ym. 2001a, 2012, Maltamo ym. 2004, 2009, Korpela ym. 2010, Vauhkonen 2010, Yu ym. 2011) laserkeilaukseen perustuvilla 3D-menetelmillä päästään puustotunnusten estimoinnissa vähintään samaan tarkkuustasoon kuin perinteisessä operatiivisen metsäsuunnittelun kuvioittaisessa arvioinnissa.

Laserkeilaukseen perustuva inventointimenetelmä vietiin operatiiviseen toimintaan melko nopeasti ensimmäisten lupaavien tutkimustulosten julkaisun jälkeen (Næsset 1997a, b, 2002; Hyyppä ja Hyyppä, 1999). Ensimmäinen laserkeilausinventoinnin operatiivinen (6000 ha) testi tehtiin Norjassa vuonna 2001, jota seurasi 46 000 ha kaupallinen inventointisopimus vuonna 2002. Ruotsissa ja Suomessa vastaavia operatiivisia testejä tehtiin vuosina 2003 ja 2004. Vuonna 2008 UPM-Kymmene laserkeilasi Suomessa metsiään jo 450 000 ha. Laserkeilaukseen perustuva yksityismetsien inventointi alkoi Suomessa operatiivisesti vuonna 2010, jolloin metsäsuunnittelua varten keilattiin yli 2 miljoonaa ha. (Holopainen ym. 2013). Nykyisenkaltainen tiedonkeruu aloitettiin 2010 ja saatettiin päätökseen 2020 (Heikkilä 2020). Vuodesta 2020 alkaen on Suomessa päätetty soveltaa yksityismetsissä 6 vuoden keilauskiertoa. Poikkeuksena pohjoisin Suomi, jossa se on 12 vuotta. (Laser2020 2020).



Kuva 1. Ilmasta maahan tapahtuvan laserkeilauksen mittausperiaate (Holopainen ym. 2000).

3.1.3 Maastolaserkeilaus

Maastolaserkeilaimella (TLS, Terrestrial Laser Scanning, maastolaserkeilaus tai maalaserkeilaus) tarkoitetaan useimmiten kolmijalalle sijoitettua laserkeilainta (Kuva 2). Maastolaserkeilain mittaa ympäristöstään kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen: suunta ja etäisyys kohteeseen mitataan, ja näiden perusteella

lasketaan kohdepisteen kolmiulotteinen sijainti. Maastolaserkeilauksen ongelmana on, että vain keilainta lähellä olevat puut voidaan mitata ja mittausgeometria vaikuttaa voimakkaasti tuloksiin. (Holopainen ym. 2013)

Lentolaserkeilauksen (ALS), liikkuvan maastolaserkeilauksen (MLS) ja maastolaserkeilauksen (TLS) yksinkertainen tekninen ero on käytetyssä alustassa: lentokone, liikkuva ajoneuvo tai ihminen, joka kantaa keilainta, tai pelkkä kolmijalka (Kuva 3). MLS voidaan myös toteuttaa joko välillä pysähtyen (engl. stop-and-go) ja keilaten tai jatkuvasti liikkeestä. Stop-and-go-malli tuottaa samanlaista dataa kuin perinteinen, kolmijalalle asetettu TLS. Etuna menetelmässä on se, että näin saadaan tarkennettua puiden kartoitusta ja mittauksia (yhdestä keilauspisteestä näkymättömät puut). (Holopainen ym. 2013)



Kuva 2. Maastolaserkeilausta (TLS) kolmijalan päälle asennetulla keilaimella (Centre of Excellence in Laser Scanning Research, Xinlian Liang).

Maastolaserkeilaimella voidaan tuottaa nopeasti tiheä kolmiulotteinen pistepilvi ympäröivästä puustosta. Mittaukseen kuluva aika riippuu haluttavasta pistetiheydestä ja mittausalasta. Vain keilaimelle suoraan näkyviä kohteita voidaan mitata, joten puuston tiheys, -peitteisyys ja mittausgeometria vaikuttavat siihen, mitä pistepilvessä näkyy ja kuinka hyvin siitä edellä mainitut ominaisuudet ovat mitattavissa. Koealoja voidaan kuitenkin mitata TLS keilaimella yli 10 yhden työpäivän aikana ja MLS keilaimella jopa useita kymmeniä, kun perinteisessä koealamittauksessa mittausnopeus on tyypillisesti 3–5 koealaa päivässä. (Holopainen ym. 2013)



Kuva 3. Puuston MLS-mittaus voidaan tehdä esimerkiksi mönkijään asennetulla keilaimella tai reppukeilaimella. (Holopainen ym. 2015)

Liikkuvien ja helposti liikuteltavien laserkeilainten soveltamismahdollisuuksia tutkitaan nykyään ahkerasti. Muun muassa hakkuukoneeseen asennetun keilaimen avulla voitaisiin muodostaa puukartta ja käyttää kerättyä puukohtaista dataa apterauksen apuna.

3.1.4 Metsävaratiedon keruu käytännössä

Lentolaserkeilaus tehdään yleensä lentokoneesta tai helikopterista. Lentolaserkeilaus muodostaa mitattavasta kohdealueesta kolmiulotteisen pisteaineiston, jossa jokaisella pisteellä on sekä x- ja y-koordinaatit että korkeus merenpinnasta (z). Metsien laserkeilauksessa käytetyt lentokorkeudet vaihtelevat 400 m–4000 m maanpinnan yläpuolella, jolloin laserkeilan koko maanpinnalla on laitteesta riippuen 0,1 m – 2 m. Yleisimmin käytetty keilauksen avauskulma nadiirista lentosuuntaa vastaan on n. 15 astetta. Lentolinjan leveys maastossa on 100 m–1000 m ja lentolinjojen välillä on yleensä 10–50 % sivupeitto. Metsien inventointitutkimuksissa käytetyt pulssitiheydet ovat tyypillisesti 0,5–20 pulssia/m² (Holopainen ym. 2013).

Metsien lentolaserkeilauksessa on tällä hetkellä olemassa kaksi päätekniikkaa puustotietojen tuottamiseen: yksinpuintulkinta (ITD, Individual tree detection, Hyypä ja Inkinen 1999) ja aluepohjainen menetelmä (ABA, Area-based approach, Næsset 1997a, b 2002 ja Hyypä 1999). Puu- tai puustotiedot tuotetaan joko mittaamalla puiden fysikaalisia ominaisuuksia suoraan 3D-pistepilvistä tai hyödyntämällä ennustettavien tunnusten ja pistepilvistä laskettujen piirteiden tilastollisia riippuvuussuhteita. Aluepohjainen menetelmä perustuu siihen, että jokainen otosyksikkö liitetään piirteiltään samankaltaisimpaan maastossa mitattuun otosyksikköön eli koelaan. Tällöin kaikille tulkittaville otosyksiköille kytetään liittämään myös maastomittaustieto. Aluepohjaista tulkintaa voidaan tehdä harvapulssisella laserkeilausaineistolla (pulssitiheys 0,5–2 pulssia/m²). Yksinpuintulkinta sen sijaan vaatii

hieman tiheämpipulssista ja kalliimpaa aineistoa (pulssitiheys yli 2 pulssia/m²) (Holopainen ym. 2015).

Suomen Metsäkeskus (myöh. Metsäkeskus) kerää metsävaratietoa kaukokartoituksen avulla. Keruujärjestelmä perustuu laserkeilaukseen, ilmakuvaukseen ja koealamittauksiin. Koealamittauksella kerätään referenssiaineisto puustotulkinnan mallinnukseen. Aiemmin vastaavat tiedot kerättiin silmävaraisesti maastossa arvioiden. Laserkeilauksella saadaan tehokkaasti tarkkaa, kolmiulotteista tietoa puuston ja maaston rakenteesta. Lisäksi hyödynnetään ilmakuvia, esimerkiksi puulajien tunnistamisessa. Laserkeilaukset tehdään lentokoneesta 1,5-2 kilometrin korkeudesta ja ilmakuvaukset vastaavasti 7-8 kilometristä. Kaukokartoituksella inventoitavat alueet ovat suuria, metsäpinta-alaltaan noin 150-200 000 hehtaarin kokoisia. Ensimmäisellä inventointikierröksellä Metsäkeskus inventoi noin 1,5 miljoonaa hehtaaria yksityismetsiä vuosittain, jolloin inventointikierto oli kymmenen vuotta (Metsäkeskus 2018a). Nykyisen laserkeilaus- ja ilmakuvausohjelman mukaan vuosittain keilataan 58 tkm², jolloin keilaussykliksi tulee 6 vuotta, poikkeuksena Pohjois-Suomi, jossa se on 12 vuotta. Nopeammasta keilauskierrosta johtuen myös vuosittainen metsien inventointimäärä tuplaantuu. Keilauksen pistetiheytenä käytetään 5 p/m². (Heikkilä 2020)

Kaukokartoitusperusteinen metsävaratiedon keruu kestää noin vuoden. Eri työvaiheiden rinnalla tehdään myös laadunvarmistusta. Laserkeilaus-, ilmakuvauk- ja koeala-aineistot toimitetaan puustotulkinnan suorittavalle yritykselle heti niiden valmistuttua maastokauden aikana. Ensimmäisenä keväänä ja kesänä alueilla tehdään laserkeilaus ja ilmakuvauksekä mitataan puustotulkinnassa tarvittavat maastokoealat. Syksyllä esikäsitellään puustotulkinnassa tarvittavat aineistot ja talvikaudella laaditaan tilastolliset laskentamallit, joiden toimivuus ja tulosten laatu varmistetaan vertaamalla maastossa mitattuun tietoon. (Metsäkeskus 2018a)

Puustotiedot lasketaan jokaiselle alueen metsätalousmaan hilaruudulle. Hilaruudut ovat 16 m x 16 m kokoisia alueita, joista inventointialue koostuu. Kartta- ja kaukokartoitusaineiston perusteella tehdään lopullinen metsikkökuviointi (Metsäkeskus 2018b). Kuvioiden puustotiedot lasketaan hilaruutujen summa- tai keskiarvotietoina. Lisäksi kuvioille tuotetaan aiemman maastotiedon perusteella kasvupaikkatiedot. Tämän jälkeen lasketaan vielä suositusten mukaiset metsänhoito- ja hakkuuehdotukset. Kaukokartoitusperusteisen metsävaratiedon julkaisu tehdään yleensä kerralla koko aineistolle toisena keväänä. (Metsäkeskus 2018a)

Metsäkeskus on asettanut puustotulkinnalle koealatason keskivirheiden (%) tavoitetasot seuraavasti (Heikkilä 2017):

	Tilavuus (V)	Pohjapinta-ala (PPA)	Läpimitta (D)	Pituus (H)
Kokonaispuusto	20	20	15	10
Pääpuulaji	30	30	20	10
Yleisin havupuulaji (mänty)	35	35	25	15
Toinen havupuulaji (kuusi)	40	40	30	20
Lehtipuu (koivu)	45	45	30	20

Koealatason tavoitteisiin on yleisesti päästy. Viiden kauden tarkistuskuvioiden mukaan kokonaispuuston keskivirhe on ollut tilavuuden ja pohjapinta-alan suhteen 12 %, läpimitan 10 % ja pituuden 6 %. Tutkimusten mukaan perinteisen kuvioittaisen arvioinnin kokonaistilavuuden keskivirhe vaihtelee 15-25 % (Heikkilä 2017).

Mikrokuviotasolla keskivirheprosentit ovat kahdella kaudella olleet seuraavat (Heikkilä 2017):

	Tilavuus (V)	Pohjapinta-ala (PPA)	Läpimitta (D)	Pituus (H)	Ikä
Kokonaispuusto	11	12	10	5	23
Mänty	31	30	17	10	27
Kuusi	43	41	31	27	33
Koivu	41	41	29	18	30

Laserinventoinnin tarkkuus kasvatus- ja uudistuskypsissä metsissä on kuvioittaisen arvioinnin tasolla tai jopa parempi. Mitä pienempää puusto, sitä haastavampaa se kuitenkin on ja näin ollen taimikoista (alle 5 m) ei nyky menetelmillä saada luotettavaa tietoa. Laserinventointia tehdään myös varttuneille taimikoille, mutta se ei käytännössä sovellu lainkaan pienille, alle 2 m taimikoille, joille tarvitaan muita tietolähteitä esimerkiksi uudistamisesta tai hoitotoista. Puuston ikää on myös hankala määrittää tällä menetelmällä. (Heikkilä 2017)

Seuraava laserkeilaukseen perustuva inventointikierron aloitettiin 2020 ja siihen tuli taas uusia piirteitä. Kansallinen keilauksen ja kuvausohjelma on suunniteltu Maanmittauslaitoksen (MML) kanssa (keilauksen pistetiheys 5 p/m² ja ilmakuvauksen resoluutio 40 cm). Monikanavakeilauksen ei ole vielä operatiiviseen tuotantoon sopivaa tekniikkaa, joten ilmakuvauksin edelleen tarvitaan erityisesti puulajitulkinnan tueksi. Monikanavakeilauksen teknologiakehitystä kuitenkin seurataan. Lisäksi on testattu ns. yksifotonikeilaustekniikkaa (single photon laser scanning), mutta 2020-luvulle mentäessä käytetään nykyisen kaltaista keilausta tiheämpipulssisena. (Heikkilä 2018)

Laserinventoinnin onnistumisen ehdoton edellytys on maastokoealojen tarkka mittaus ja edustavuus. Jos jonkin tyyppisistä metsistä ei löydy koealoja puustotulkinnan referenssiksi, niin menetelmäkään ei voi niitä tuottaa. Kattava koeala-aineisto luo edellytykset myös koealojen todellisten puulistojen käytölle puustotulkinnassa, jolloin läpimittajakauman muodostamiseen ei tarvita yleistäviä malleja ja saadaan todennäköisesti myös paremmat runkolukusarjaennusteet. Tähän asti käytössä on ollut kiinteäsäteisiä maastokoealoja. Jatkossa on tavoitteena mitata pinta-alaltaan suurempia puukarttakoealoja, joille voidaan generoida puuston mallinnuksen ja puustotulkinnan referenssikoealat, mikä tarkoittaa, että yhdellä isommalla puukartalla on useita pienempiä tulkintakoealoja, joilla on eri puut. Tämän uudentyyppisen puukarttakoealan koko on noin 1 000-2 000 m² nykyisen säteeltään 9 metrin ympyräkoealan sijaan. Koealojen paikannuksen tarkkuusvaatimus kasvaa, koska yksittäisten puiden ja kaukokartoitusaineistojen täytyy olla tarkasti samasta kohdasta. (Heikkilä 2018)

2000-luvulla Metsäkeskuksen maastotyönä kerätyn metsätiedon hinta oli 16-17 €/ha. 2010-luvulla tiedonkeruun kustannuksia saatiin laserinventoinnin myötä noin 4 €/ha tasolle ja tietoa myös ajantasaistetaan jatkuvasti. 2020-luvun tavoitteet ovat vaatineet kehittämistyötä, uusien menetelmien käyttöönottoa ja laadukkaampia lähtöaineistoja. Tämän vuosikymmenen alun siirtymävaiheen jälkeen kustannukset laskevat edelleen teknologiakehityksen, automatisoinnin ja uusien menetelmien vakiintumisen myötä. Tiedon laatu ja käyttökelpoisuus tulevat myös parantumaan. Kustannukset tulevat todennäköisesti vakiintumaan 2020-luvun kuluessa luokkaan 2-3 €/ha. (Heikkilä 2018)

Kuten edellä on kuvattu, metsien kaukokartoitus keskittyy laajojen alueiden puuston inventointiin metsikkökuvioitasojen tietojen avulla. Nykyiset menetelmät eivät vielä tuota riittävän tarkkaa tietoa yksittäisistä puista, mitä voitaisiin käyttää suoraan puunkorjuun tai runkojen apterauksen apuna.

3.2 Tutkimuksen nykytila

Jo vuosia, tai oikeastaan vuosikymmeniä, on puhuttu, kuinka metsäteollisuuden varastot siirtyvät yhä enemmän pystypuustoon. Tällöin korostuu metsä- ja leimikkosuunnittelutiedon

tarkkuuden merkitys. Ennen hakkuukonemittauksen aikakautta 1970- ja 1980-luvulla suuri osa puukaupasta (n. 50 %) perustui pystymittaukseen (Hyyppä ym. 2011). Ajatuksena jo tuolloin oli, että tarkasti ennakkoon mitattua tietoa voidaan hyödyntää puunhankinnan logistiikan ohjauksessa. Pystymittaus oli kuitenkin kallis menetelmä, josta luovuttiin hakkuukonemittauksen yleistyttyä 1980-luvun loppupuolella. Yksinpuintulkintaan (Individual Tree Detection, ITD) perustuva menetelmä yhdistettynä voisivat mahdollistaa edullisen tavan palata pystymittauksen aikakauteen. Tietoa voidaan edelleen rikastaa tarkkojen maastolaserkeilausten avulla.

Perinteisen lentolaserkeilausten haasteina ovat olleet kuitenkin yksittäisten puiden löytyminen, puulajitulkinta sekä runkojen laadun mittaus. Mikäli nämä haasteet pystytään ratkaisemaan tyydyttävällä tavalla, puunhankinnan logistiikkaa ja puiden apteerausta olisi mahdollista tehostaa ja tarkentaa. Lisäksi analysoimalla laserkeilauksella saatua puustotulkintaa ja maastomallia paikkatietojärjestelmissä on mahdollista kehittää monia mielenkiintoisia käytännön metsänhoitoa palvelevia sovelluksia, kuten metsätalouden vesistövaikutusten arviointi, kunnostusojituksen tarpeen selvittäminen tai leimikon korjuukelpoisuuden määrittäminen.

Metsiin sitoutuneen biomassan inventointiin on suurta mielenkiintoa maailmanlaajuisesti niin metsien hiilitaseen kuin bioenergian ja kartoituksen näkökulmista. Laserkeilauksella on useita etuja verrattaessa sitä vaihtoehtoihin inventointimenetelmiin. Laserkeilausten avulla on mahdollista saada tarkkaa tietoa niin puuston pituudesta, runkotilavuudesta kuin latvuston koosta ja rakenteesta. Lentolaserkeilausten tulosta voidaan tarkentaa maastossa tapahtuvilla lasermittauksilla. Lehtosen ym. (2004) mukaan pohjoisissa havumetsässä 75–85 % puun biomassasta on puun rungossa. Laserkeilaustutkimuksissa on todistettu, että nimenomaan runkotilavuuden estimointitarkkuutta pystytään parantamaan huomattavasti satelliitti- tai ilmakuvaestimaatteihin verrattuna laserkeilausten tuottaman 3D-tiedon avulla. Runkotilavuus ja puuston biomassassa korreloivat vahvasti puuston pituuden kanssa, joten pelkästään laserkeilaukseen perustuvalla puuston pituusmittauksella pystytään tekemään myös biomassakartoitusta vähintäänkin samalla tarkkuudella kuin esimerkiksi lehtialaindeksiin perustuvilla mittauksilla. (Hyyppä ym. 2011)

Laserkeilaukseen perustuvalla muutostulkinnalla on useita potentiaalisia tulevaisuuden sovelluksia, etenkin siinä vaiheessa, kun useamman ajankohdan laserkeilausaineistoja on riittävän pitkältä aikaväliltä saatavilla. Kahden tai useamman ajankohdan laserkeilausaineistot tuovat lisämahdollisuuksia operatiiviseen toimintaan, kuten metsikön puuntuotoksen määrittämiseen ja hoitotoimenpiteiden ja tuhojen seurantaan. Toisaalta ne avaavat mielenkiintoisia mahdollisuuksia metsien kasvun dynamiikan tutkimukseen. Tällä hetkellä tutkitaan laserkeilausten hyödyntämismahdollisuuksia kaiken aikaa laajempien alueiden inventoinneissa.

Tarkkuuden lisäksi on selvitettävä eri kaukokartoitusmenetelmien kustannustehokkuus. Laserkeilaus on aputietona kallista verrattuna satelliittikuviin. Ainakin laajojen alueiden monitorintisovelluksissa tarvitaan tulevaisuudessakin lentolaserkeilausten lisäksi myös muuta kaukokartoitusaineistoa. Viime vuosina onkin tutkittu esimerkiksi korkean resoluution tutkasatelliittikuvatulkinnan yhdistämistä laserkeilaustulkintaan. Aivan uudelle tasolle globaaleissa sovelluksissa voidaan päästä, mikäli vireillä olevat satelliittilaserkeilausohjelmat toteutuvat. Yleisesti uskotaankin, että metsävarojen inventoinnin ja metsäsuunnittelun tehostaminen on vasta alkua laserkeilausten mahdollistamalle teknologiaharppaukselle. Lähitulevaisuudessa voidaan mitä todennäköisimmin nähdä merkittäviä mahdollisuuksia etenkin puunhankinnan logistiikan ja puunkorjuun tehostamisessa sekä metsissä tapahtuvien biomassamuutosten seurannassa.

Laserkeilausta hyödynnetään jo nykyisin REDD-ohjelmaan (Reducing Emissions from avoided Deforestation and Degradation) liittyvissä laajojen metsäalueiden inventoinneissa ja seurannassa, tulevaisuuden trendi lienee laserkeilausten hyödyntäminen kaiken aikaa suuremmilla alueilla, lopulta tavalla tai toisella jopa globaaleissa sovelluksissa.

Tulevaisuudessa erilaisten laserkeilausmenetelmien yhdistäminen hakkuukonemittauksiin tulee mahdollistamaan ns. täsmämetsätalouden (precision forestry) (Holopainen & Hyyppä 2009) eli tarkan metsävaratiedon hyödyntämisen kaikilla metsätalouden osa-alueilla. Tämä kehitys mullistaa operatiivisen metsäsuunnittelun leimikkosuunnittelun ja valtakunnanmetsien inventoinnin (VMI) nykykäytännöt sekä mahdollistaa merkittäviä kustannussäästöjä ja lisäarvoa puun jalostusketjussa. Tällöin tärkeitä tutkimusaiheita ovat mm. TLS-/MLS-/ALS- ja hakkuukonemittausten yhdistäminen, puiden paikannustarkkuuden parantaminen, tukin laadun mittaaminen sekä uusien sensorien (aaltomuoto-LiDAR, hyperspektri-LiDAR, Vauhkonen ym. 2013b) hyödyntäminen runkolukusarjan ennustamisessa ja puulajitulkinnassa. Operatiivisessa toiminnassa keskeisiä kysymyksiä ovat, mikä entistä tarkemman inventointitiedon arvo on ja kuinka metsävaratiedossa tapahtuvia muutoksia päivitetään mahdollisimman ajantasaisesti.

Metsätalouden päätöksenteko perustuu tietoon puuvarannoista. Käytettävä inventointimenetelmä riippuu tarkkuusvaatuksesta, inventoinnin mittakaavasta ja inventointiin käytettävissä olevista resursseista. Suurin osa inventoinneista pohjautuu maastotantoihin ja tarkkuus perustuu maastotyön laatuun ja määrään. Perinteisesti maastotyö on toteutettu yksinkertaisilla manuaalisilla mittausräikeillä.

Kun mittaustulos halutaan paikallistaa kartalle, tarvitaan kaukokartoitusmenetelmiä. Paikkatiedon hankinta on metsävaratiedon hankinnan suurin kustannuserä (Holopainen ym. 2013). Maanpinnalta tapahtuva laserkeilaus eli TLS-mittausteknologia tarjoaa mittaustekniikkaa, jolla saadaan millimetrituokan tarkkuudella dataa ympäröivästä alueesta. Tämä mahdollistaa nopean, automaattisen ja tarvittaessa jaksottaisen estimaatin keskeisistä metsän arviointiin tarvittavista puustotunnuksista.

On arvioitu, että TLS tulee olemaan operationaalisisessa metsänarviointikäytössä heti, kun sopiva tiedonkäsittelyohjelmisto tulee saataville ja parhaat mittauskäytännöt ja yleinen tietoisuus teknologiasta kasvaa (Hyyppä ym. 2011). Samanaikaisesti kehittyvät myös liikkuva laserkeilaus (MLS) henkilökohtainen kannettava laserkeilainteknologia (PLT) ja kuvadatan arviointiin perustuvat pistepilvet, joiden arvioidaan kykenevän tuottamaan samanlaista kartoitusdataa kuin TLS.

MLS/PLT kehitystyö etenee selkäreppulaserkeilauksen tutkimisella, jossa mm. Kaartinen ym. (2015) ovat selvittäneet runkojen löytymis- ja paikannustarkkuutta 2000 m²:n koealalla. Runkojen löytymistarkkuus oli 82,6 % ja paikannustarkkuus 0,38 m.

Mobiililaserkeilaus (MLS, Mobile LiDAR, VLS = vehicle based laser scanning) on lentolaserkeilauksen (= ALS airborne laser scanning) modifikaatio. Se muistuttaa ALS-keilausta siinä, että se hyödyntää laserskanneria, GPS paikanninta, liikeanturia (IMU) ja mahdollisesti kameroita, mutta sitä käytetään liikkuvan koneen päältä, esim. auton tai harvesterin ja näin ollen keilausetaisyys on lyhempi ja tämän vuoksi pulssitiheys voi olla suurempi kuin lentolaserkeilauksessa. (Holopainen ym. 2013)

Nykyisellään MLS data voidaan prosessoida samoilla menetelmillä ja ohjelmistoilla kuin TLS tai ALS-dataa. Kuitenkin vaihtelevat pistetiheydet ja skannausgeometrian muutokset (skannausetaisyyden funktiona) tarkoittavat, että dataprosessointia tulisi kehittää yksinomaan MLS:n tarpeisiin soveltuvaksi.

Aikaisempi tutkimus on osoittanut, että ALS, TLS ja MLS kärsivät kaikki näkyvyyteen liittyvistä puuntunnistuksen ongelmista. Alemman latvuserroksen puusto vaikeuttaa maanpinnan tasolta tapahtuvaa keilausta ja puuston latvusten peittävyys puolestaan ilmasta tapahtuvaa keilausta.

Yhtenä ratkaisuna on mietitty ALSITD-skannausta (ALS airborne laser scanning + individual tree detection), mutta sitä ei juurikaan käytetä, johtuen edellä mainituista puuntunnistuksen

ongelmista ja ALS datan korkeammista kustannuksista. (Falkowski et al. 2008, Kaartinen ja Hyypä 2008, Vastaranta et al., 2011)

Kaartinen and Hyypä (2008) raportoivat kansainvälisestä kokeesta, jossa kokeiltiin erilaisia ITD-metodeja samalla koealalla. He kirjoittavat pohjoisissa metsätyypeissä puuntunnistustarkkuudesta, joka vaihteli välillä 25-90 %. Maltamo et al. (2004) raportoi yleisestä puun tunnistamisen tarkkuudesta tasolla 39,5 %, joskin pääpuulaji oli tunnistettu 83 % tarkkuudella.

Puuntunnistustarkkuutta TLS menetelmässä on selvittänyt mm. Maas et al. (2008) ja Liang et al. (2012). Maas et al. (2008) tarkasteli TLS skannerisysteemiä ja sen käytettävyyttä metsässä. Luotettavuus ja tarkkuus rinnankorkeusläpimitan määrittämisessä, puun pituuden määrittämisessä ja runkokäyrän tulkinnassa selvitettiin. Maas et al. (2008) käytti viittä erillistä koealaa vaihtelevilla skannausasetuksilla. Tulokseksi saatiin 97,5 %:n puuntunnistustarkkuus Liang et al. (2012) raportoi yleisestä runkokäyrän tunnistustarkkuudesta 73 % yhdeksällä koealalla käyttäen automaattista algoritmia yksinkertaisella skannauksella.

Jaakkola et al. (2010), Lehtomäki et al. (2010) and Rutzinger et al. (2010) ovat selvittäneet MLS:n käyttämistä puiden ja pylvästyypin objektien tunnistamisessa. Tämän tyyppisille kohteille tunnistustarkkuus on ollut 69,7 % - 90 % ja tunnistuksen paikkansapitävyys on vaihdellut välillä 83 % - 93 %.

Urbaanissa ympäristössä laserskannausmenetelmiä on käytetty mm. kasvillisuuden kartoituksessa ja viherrakenteiden määrän arvioinnissa. Urbaania vihreää tilavuutta (yksittäisten puiden ja ruoho-objektien tilavuus) on arvioinut mm. Hecht (2008). He ovat käyttäneet ilmasta tapahtuvaa ALS (LiDAR) ja hyperspektrikuvia puulajien tunnistamiseen. Kokonaistarkkuudeksi he saivat 68,8 %.

3.3 Optiset etäisyysmittausteknologiat

3.3.1 Edulliset, konenäköön, kuluttajatuotteisiin tarkoitetut 3D-kuvantavat CMOS kamerapohjaiset tekniikat

Kaupallisesti on tarjolla valon kulkuaikaan perustuva vaihevertailutekniikka sekä geometriseen toimintaperiaatteeseen perustuvat rakenteelliseen valaisuun sekä stereonäköön pohjautuvat kuvantavat 3D-mittaustekniikat, jotka suorittavat mittauksen CMOS (CCD) kamerakennoilla ja tuottavat siten "natiivia 3D-kuvaa". Luonnonvalo rajoittaa näillä tekniikoilla saavutettavan mittausetäisyyden ulko-olosuhteissa muutamaan metriin ja kaksi jälkimmäistä tekniikkaa vaatii esteettömän näkemän kohteeseen vähintään kahdesta suunnasta, mikä rajoittaa tekniikoiden soveltuvuutta peitteisten kohteiden kuten puun runkojen mittauksessa. Stereonäkö vaatii toimiakseen kohteelta riittävän selvää ja yksikäsitteistä struktuuria, mikä ei myöskään aina toteudu puun rungolla.

3.3.2 Lineaariseen elektroniseen signaalinkäsittelyyn perustuvat, pistemäisellä mittauspisteellä 3D-keilaavat LiDAR laitteet

Edellistä laiteryhmää huomattavasti kalliimmat, mutta pidempiin mittausetäisyyksiin (kymmeniä - satoja metrejä), hyvään tarkkuuteen luonnonvalossa yltävät laserkeilaustekniikat suorittavat mittauksen "koaksiaalisella" säteellä, jossa laserilla tuotettu valaisusäde on kytketty samalle akselille kohdetta havainnoivan detektorin näkemän säteen kanssa päällekkäin siten, että tällä "koaksiaalisella" keilalla optomekaanisen keilaimen avulla pyyhitään mitattavaa avaruuskulmaa. Etäisyys kohteeseen kulloinkin tarkasteltavassa suunnassa määritetään siten, että laseria moduloidaan ja mitataan viive, jonka jälkeen tuotettu modulaatio havaitaan vastaanotetussa signaalissa. Kohteen etäisyys lasketaan viiveen ja tunnetun valon nopeuden

avulla. Termillä "lineaaritekniikka" tarkoitetaan sitä, että vastaanotettuja fotoneja ei detektoida erikseen vaan ne tuottavat vastaanottimella virtasignaalin, joka käsitellään lineaaripiireillä elektronisessa signaalinkäsittelyssä niin, että piireissä signaalien amplitudit ovat verrannollisia (=lineaarisesti riippuvia) vastaanottimella kerätystä intensiteetistä.

Modulointiperiaatteet voidaan jakaa kahteen: pulsed Time Of Flight (TOF) ja vaihevertailuperiaatteeseen. Molemmat vaativat toimiakseen sähköisestä kohinasta riittävän hyvin erottuvan signaalin (pulsed TOF tekniikassa noin 400 detektorilla havaittua fotoelektronia), mikä rajoittaa menetelmän herkkyyttä. Molemmissa tekniikoissa samalla mittausjäljenteellä liian lähellä toisiaan sijaitsevat (luokkaa metri), signaalia/kaikua tuottavat kohteet (joista ensimmäinen on osittain valoa läpäisevä) tuottavat ajallisesti sekoittuneen signaalin, josta peräkkäisten kohteiden, varsinkaan kauimmaisen, etäisyyksiä ei voida määrittää. Tämä rajoittaa tekniikoiden kykyä mitata puun arvokkaimman osan, rungon 3D muotoa, oksiston lävitse tai toimia muutoin peitteisissä olosuhteissa, myös lumi- ja vesisateessa. Nämä kaksi epäideaalisuutta muodostuvat pohjimmiltaan pitkään tunnetun lineaarisen elektroniikan komponenttitekniikan rajoitteista, joiden kohdalla tapahtunut tekninen kehitys on ollut viime vuosina jo varsin hidasta, "inkrementaalista".

3.3.3 Yksifotonilaskentaan perustuva LiDAR-tekniikka

Yksifotonilaskentaan perustuva etäisyysmittaus toteutetaan niin kutsutulla "fotonidetektorilla" (single photon counting detector), joka kykenee ilmaisemaan ja suoraan ajoittamaan noin 50 - 500 pikosekunnin tarkkuudella yksittäisiä fotoneita. Tyypillisesti yksifotonilaskennassa detektorina käytetään SPAD (Single Photon Avalanche Detector) detektoreita.

Perinteiseen "lineaariseen ilmaisimeen (=detektoriin)" perustuvassa LiDAR mittauksessa vastaanotettu valosignaali muutetaan analogiaelektroniikkapiirillä elektroniseksi signaaliksi, jossa signaalin intensiteetti ajan funktiona vastaa lineaarisesti vastaanotettua valon intensiteettiä ja vastaanotettu valopulssi ajoitetaan etäisyysmittausta varten näin muodostuneesta analogiasignaalista. Linearisessa menetelmässä on olemassa sille ominaisia rajoitteita: Signaalin rajalliset nousu- ja laskunopeudet rajoittavat sensorin aikaresoluutiota ja dynamiikkaa. Detektorille on kyettävä keräämään noin 500 fonia per vastaanotettu laser pulssi tai "kaiku" kaiun ajoittamiseksi. Yksifotonilaskentaan perustuva tekniikka tarjoaa näissä suhteissa merkittävää etua ja signaalinkäsittelyyn tarvittavan piirin fyysinen pinta-ala on lineaaritekniikkaan verrattuna huomattavasti pienempi.

Yksifotonilaskentaa on jo sovellettu lentolaserkeilauksena metsän latvuston rakenteen ja maapohjan 3D-mittaukseen (Swatantran 2016, Wästlund 2018), mutta tässä projektissa toteutettua yksittäisten runkojen 3D-muodon mittausta, mukaan lukien peitteisten runkojen mittausta tutkivia artikkeleita ei suoritettussa tietohaussa löytynyt.

Markkinoille on tullut yksifotonilaskentaan perustuva, lentolaserkeilaukseen soveltuva kaupallinen tuote (Leica SPL100), jonka on todettu saavuttavan saman pistetiheyden 3000 m lentokorkeudesta kuin joka saavutetaan lineaariseen ilmaisuun perustuvalla laitteella 400 m lentokorkeudesta (Wästlund 2018).

Ajatellen tämän projektin keskeistä tavoitetta, metsässä suoritettavaa puun rungon 3D-muodon mittausta, yksifotonilaskentaan perustuva LiDAR-toteutus tarjoaa perinteiseen lineaariseen LiDAR-toteutukseen nähden seuraavat edut:

1. Suurempi herkkyys: Mittaamalla riittävä määrä valopulsseja, etäisyysmittaus haluttuun kohteeseen voidaan suorittaa vaikka keskimääräinen havaittujen fotonien lukumäärä / valopulssi olisi alle 1 kpl (Chan 2019). Tästä syntyy etua mitattaessa heikosti

heijastavia, mahdollisesti oksien tms. peittämiä kohteita tai mitattaessa suurelta mittausetäisyydeltä.

2. Tekniikalla on parempi kyky erotella erillisiä kohteita mittauksen (z-) syvyysuunnassa ("range resolution"), (Henriksson 2016) minkä seurauksena etäisyys risujen, havujen, oksien, lehvästön (osittain) peittämästä rungosta voidaan saavuttaa luotettavammin, useammin ja tarkemmin kuin lineaaritekniikalla – ja esim. runkoa peittävät havut saavat sijaita lähempänä mitattavaa rungon pistettä onnistunutta mittausta estämättä.
3. Merkittävästi parempi sietoisuus ilmassa leijuvan lumen, vesipisaroiden, sumun tai jääkiteiden tuottamalle takaisinsironnalle. Tämä vähentää heikkojen olosuhteiden mittauksille muodostamaa ongelmaa ja virhettä.

Yksifotonilaskennassa on tarpeen lähettää useampia laserpulseja kuin lineaaritekniikassa yhtä syvyysuuntaista mittaustulosta kohti, mutta pulsseissa tarvittava energia on pienempi, joten niitä voidaan lähettää suuremmalla taajuudella silmäturvallisuutta vaarantamatta.

Edelleen, koska tekniikassa tarvittavan signaalinkäsittelyelektronikan fyysinen pinta-ala on pieni, mittausnopeutta voidaan nostaa rinnakkaistamalla x-y suunnassa (etäisyys kohteeseen = z) suuri määrä mittauskanavia toteuttamalla detektoriratkaisu siten, että samalle monoliittiselle piirille sijoitetaan x-y suunnassa tapahtuvaa kuvantamista varten suuri määrä detektoripikseleitä, (esim. 240×320 , Chan 2019), joista jokaisen tarvitsema fotonin ajoituslogiikka on toteutettu samalle IC (Integrated Circuit) piirille, joka yleensä toteutetaan CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) tekniikalla. CMOS IC:n valmistuskustannukset ovat suurissa määrissä hyvin edulliset ja tekniikalla saadaan aikaan suorituskykyisiä, tiheitä SPAD detektorimatriiseja (Jahromi 2016).

Yksifotonilaskentaan perustuva LiDAR tekniikka on nuorta ja vasta tulossa kaupalliseen käyttöön. Erityisesti CMOS SPAD-matriisien käyttöön perustuvaa LiDAR tekniikkaa tutkitaan ja kehitetään tällä hetkellä suurilla panostuksilla, kun tavoitellaan edullista mutta suorituskykyistä LiDAR tekniikkaa käytettäväksi itseohjautuvissa ajoneuvoissa. Tässä projektissa on toisaalla osoitettu, että yksifotonilaskentatekniikkaan perustuen puun runkojen 3D-muodot ovat mitattavissa - jopa millimetrituokan tarkkuudella ja jopa peitteisessä kuusimetsässä, jossa perinteinen lineaaritekniikka on vaikeuksissa. On odotettavissa, että tulevaisuudessa tämän uuden tekniikan alueelle tehtävät panostukset ja sillä tuotettu tietämys, synnytetty hinnaltaan laskeva ja suorituskyvyltään kasvava komponenttitekniikka, instrumentti- ja sovellusosaaminen sekä saataville tulevat edulliset kaupalliset instrumentit mahdollistavat aikanaan moninaisten sovellusten toteuttamisen moninaisiin puunkorjuun sovelluksiin ja tekniseltä toteutukseltaan eritasoisiin koneen automaattioratkaisuihin. Uuden mittaustekniikan mahdollistamia ratkaisuja voivat olla alussa kuljettajan työsuoritusta helpottavat, sen tarkkuutta ja työn laatua parantavat toiminnallisuudet - ja lopulta itseohjautuvat metsäharvesterit ja ajokoneet.

3.4 Yhteenveto ja jatkotutkimustarpeet

Yhteenvetona aiemmasta tutkimuksesta voidaan todeta, että mobiili laserkeilaus on kehittynyt nopeasti ja saavutetut tulokset ovat lupaavia. Menetelmän keskeisimpiä haasteita ovat mm. soveltuvien ohjelmistojen puute ja menetelmän tarkkuus peitteisessä maastossa (lasersäteet eivät läpäise latvuksia ja runkojen tunnistamistarkkuus jää heikolle tasolle). Paikantaminen peitteisessä maastossa on edelleen haastavaa ja vaikuttaa puiden tilavuuden arviointitarkkuuteen.

Tämän hankkeen tutkimus keskittyi maasta tapahtuvan mobiilin laserkeilauksen (MLS) kehittämiseen. Hankkeen tavoitteena oli mobiilin laserkeilauksen tutkiminen hyödyntäen uutta edullista kannettavaa keilainteknologiaa. Tämän hankkeen yksi tavoite on tuottaa runkokohtaista 3D-puustotietoa maasta tehtävällä, risukon, sateen yms. esteiden tuottaman ”roskasignaalin” sietävällä (fotonilaskenta) LiDAR:lla.

Tavoite oli lisäksi tarkastella edullisten laserkeilainten käytön mahdollisuuksia ns. jokamiesluokassa, jolloin tiedonkeruu voidaan joukkoistaa metsäammattilaisia laajemmalle yleisölle, koskemaan potentiaalisesti koko metsänomistajakuntaa. Näin toimittaessa ja etenkin metsänomistajien toimiessa omatoimisesti tietomäärä saadaan karttumaan nopeasti ja puustodatan hinta saadaan hyvin edulliselle tasolle

Jatkotutkimustarpeena on lisäksi sopivien helppokäyttöisten ohjelmistojen kartoittaminen ja kehittäminen sekä datan prosessointiin että tulosten visualisointeihin.

4. Rajaukset

Tavoitteiden mukaisesti projektissa keskityttiin tuottamaan uutta tietoa sekä maastossa että laboratorio-olosuhteissa tehdyillä mittauksilla ja vertailuilla. Eri metsänmittausmenetelmiä ja -välineitä käytettiin kolmella keskisuomalaisella leimikolla. Mittausten tuloksia ja laitteiden soveltuvuutta arvioitiin ja verrattiin keskenään.

VTT:n Oulun yksikössä määritettiin halliolosuhteissa puun rinnankorkeusläpimittaa erilaisilla kaupallisilla ja VTT:n SPAD-LiDAR koelaitteella. Lisäksi SPAD-LiDAR koelaitetta käytettiin puun läpimitan ja lenkouden määrittämiseen lähimetsikössä. Siellä vertailulaitteena käytettiin ZEB Horizon kannettavaa laserskanneria. Kaikissa mittauksissa pyrittiin selvittämään laitteiden tarkkuutta ja käytettävyyttä sekä selvästi näkyvän että peitteisessä maastossa olevan puun rungon mittauksessa.

5. Maastomittausten menetelmät ja kohteet

5.1 Kohteet

Maastomittaukset suoritettiin pääasiassa kesäkuun lopussa 2019 kolmella metsäkuviolla, jotka valittiin yhteistyössä Keski-Suomen metsänhoitoyhdistyksen kanssa hakkuuseen menossa olevista yksityismetsiköistä. Kohteista yksi päätehakkuukuusikko sijaitsi Keuruulla ja toinen päätehakkuukuusikko sekä ensiharvennusmännikkö Saarijärvellä. Nämä olivat tyypillisiä keskisuomalaisia metsätalouksmetsiköitä (

Taulukko 1).

Kaikki koeleimikot pystymitattiin ja inventoitiin perustuen PreFor (Silvere) Oy:n laserkeilausmenetelmään sekä Trestima -matkapuhelinsovellukseen. Käytössä oli myös yleiseen metsävaratietoon perustuvat inventointitiedot. Lisäksi kahdella päätehakkuukuusikolla kokeiltiin Geotrim Oy:n maahantuomaa kannettavaa keilainta GeoSLAM ZEB Horizon 3D. Erikseen valitut koepuut kuvattiin peitteisessä maastossa myös kyseisellä laitteella. Mittausten pääasialliseksi referenssiksi asetettiin hakkuukoneista saatu korjuudata sekä pystymittausaineisto. Koepuita verrattiin kuitenkin manuaalimittauksiin.

Keuruun päätehakkuuleimikolla ja Saarijärven harvennuksella puusto hakattiin syyskuun (2019) alussa, kun taas Saarijärven päätehakkuu siirtyi saman vuoden joulukuulle. Leimikot merkattiin mittausta varten selkeästi kuitunauhoin. Harvennusleimikossa oli tehty

ennakkoraivaus ennen mittausta ja hakkuuta. Jokaiselta koekuviolta valittiin erikseen koepuita, jotka mitattiin tarkemmin pystymittauksen ja VTT:n kuvausten yhteydessä. Niiden mittoja ja tilavuuksia verrattiin muiden menetelmien tuloksiin. Koepuista osa oli leimikkoa hyvin edustavia ja osa tarkoituksella etsittyjä huonolaatuisia tai heikosti näkyviä puita.

Taulukko 1. Valitut leimikkokohteet ja metsänhoitoyhdistyksen leimausselosteen mukaiset hakkuukertymät (arviot).

Leimikkotyyppi	Koko, ha	Kunta	Pääpuulaji	Metsä-tyyppi	Ikä, v	Leimausselosteen mukainen arvioitu hakkuukertymä, m ³
Avohakkuu	1,17	Keuruu	Kuusi	OMT	70	313
Avohakkuu	1,5	Saarijärvi	Kuusi	OMT	80	267
Ensiharvennus	1,65	Saarijärvi	Mänty	MT	35	102

Keuruun päätehakuukuusikko hakattiin Metsä-Multian toimesta 2.-3.9.2019. Koneena käytettiin Ponsse Ergoa, jossa oli Ponsse H-8 hakkuupää ja mittalaitteena OptiWin 4.745. Saarijärven harvennuksen teki Forest-Linna 4.-6.9.2019 John Deeren 1179 E koneella, jossa oli H414 hakkuupää ja Timbermatic H12 mittalaitte. Sama yritys hakkasi 4.12.2019 myös Saarijärven avohakkuuleimikon koneena John Deere 1270G JD H415 hakkuupäällä ja Timbermatic H 2.1.24 mittalaitteella varustettuna.

5.2 Pystymittaus

Kaikki leimikot arvioitiin perinteisellä pystymittausmenetelmällä soveltaen yleistä pystymittausohjetta (PMP-ohje 1982) (Kuva 4). Pystymittaus on todettu antavan tarkkoja metsikkötason tuloksia, mutta on työläs ja kallis menetelmä (Hyypä ym. 2011). Ohjeen mukaan jokainen hakattava puu luettiin rinnankorkeuslähimittaan mukaan kahden senttimetrin tasaaviin luokkiin. Mitattavien puiden alarajaksi määritettiin leimikon hakkuuohjeen mukaisesti mäntykuidulle 6 cm kolmen metrin korkeudesta, vastaavasti kuusikuidulle 7 cm ja koivukuidulle 7 cm. Käytännössä nämä vastasivat 9 cm rinnankorkeuslähimittaluokkaa. Tukin alarajana käytettiin männylle 15 cm 4,3 metrin korkeudessa, kuuselle 15 cm 4,0 metrin korkeudessa ja koivulle 18 cm 3,4 metrin korkeudessa. Rinnankorkeus mitattiin joko maan pinnalta tai puun syntypisteestä, riippuen maaston kaltevuudesta (Laasasenaho 2018). Myös muut lehti- ja havupuut luettiin omiin sarakkeisiinsa, vaikkei niistä varsinaista ainespuutavaraa tehtykään. Hakkuukoneen hakkuudataa vertailemalla nähtiin, mitkä rungot todellisuudessa laskettiin ainespuuksi ja mitkä hakattiin energiapuuksi. Mainittakoon tässä yhteydessä, että pikkutukkiosuutta ei erikseen määritetty vaan ainoastaan tukin ja kuidun osuus edellä mainituilla dimensioilla.

Toisella avohakkuuleimikolla (Keuruu) tykkylumi oli katkonut merkittäviä määriä puun latvoja (n. 80). Ne latvat, joista oli mahdollista tehdä ainespuuta, mitattiin erikseen ja huomioitiin kokonaislaskennassa kuitupuuna.

Pituuskoepuut otettiin lähimittaluokittaisena määrävälilotantana puiden pohjapinta-alalla painottaen. Kuuden metrin ylälähimittoja ei mitattu vaan sen sijaan laskennassa sovellettiin Laasasenahon (1982) puiden kapenemiskäyriä, joiden avulla laskettiin puuston tilavuus Metsäkeskukselta saatuun laskentapohjaan.



Kuva 4. Harvennusleimikon pystymittausta.

5.3 Trestima

TRESTIMA®-teknologia on älypuhelinsovellukseen perustuva tapa arvioida metsää. Metsikkö mitataan ottamalla älypuhelimella kuvia tasaisesti ympäri arvioitavaa metsäaluetta, minkä jälkeen konenäkö laskee puustotunnukset valokuvista puulajeittain muutamassa minuutissa. Metsänmittausjärjestelmä tunnistaa automaattisesti puulajit ja laskee metsikön puulajikohtaiset perustunnukset, kuten pohjapinta-alan, runkoluvun, keskiläpimitan, keskipituuden ja tilavuuden.

Trestiman puuston pohjapinta-alalaskenta perustuu Bitterlichin relaskoopiperiaatteisiin (Bitterlich 1984). Kun relaskoopilla pyörähdetään 360°:n ympyrä, Trestimalla otetaan yksi kuva, joka edustaa, kamerasta riippuen, n. 60-70° ympyrän sektoria. Relaskoopilla kiinteä relaskoopikerroin on yksi, mikä tarkoittaa, että jokainen hahlon täyttämä puu lisää pohjapinta-alaa yhden neliömetrin hehtaaria kohden. Trestimassa ei ole kiinteää relaskoopikerrointa vaan puuston pohjapinta-ala lasketaan dynaamisesti kertoimen välillä 0,6-1,4. Pienestä hahlostä johtuen Trestima poimii kauempänä olevia puita tulokseen perinteiseen menetelmään verrattuna.

Trestiman puustoinventointi perustuu valokuviin, jotka on otettu vapaavalintaisista kohdista metsikköä. Sovellus laskee jatkuvasti puuston pohjapinta-alan keskihajontaa ja kehottaa ottamaan lisäkuvia, mikäli hajonta on liian suuri. Suositeltava kuvien määrä on 5-10. Kuvia tarvitaan enemmän silloin, kun puusto on harvaa, se on epätasaista tai kun puuston keskiläpimitta on alle 12 cm. Luonnollisesti runkolukusarja on sitä tarkempi mitä enemmän kuvia otetaan. Trestima selvittää automaattisesti puuston pituuden ja iän GPS-sijainnin ja kasvupaikkaluokan perusteella. Mediaanipuun rinnankorkeusläpimitta ja pituus on mahdollista syöttää myös manuaalisesti tai mitata muutama (2-3) mediaanikoepuu Trestiman avulla. (Trestima 2019)

Mittaustapahtumat ja tulokset kuvineen tallentuvat automaattisesti Trestiman pilvipalveluun. Pilvipalvelussa mittauksia voi tarkastella jälkikäteen yksittäisten näytteidien tarkkuudella ja kokonaisuutena karttapohjaa vasten. Palveluun voidaan myös tuoda tilojen ja kuviodien rajoja, jolloin ne välittyvät mobiilisovelluksen kartalle automaattisesti. Puustotunnukset voidaan tulostaa palvelusta suoraan raporteiksi tai raakadata siirtää automaattisesti tietokantaan tai järjestelmään jatkokäsittelyä varten.

Tässä tutkimuksessa kuvia otettiin tietoisesti enemmän, 15-20 kpl/ha, keskivirheen pienentämiseksi ja koska sovelluksen käyttö ei ollut ennestään tuttu. Lisäksi haluttiin hahmottaa kaikki leimikot mahdollisimman hyvin jatkomittauksia varten.

5.4 Silvere

Silveren täsmäinventaarior perustuu pääasiassa lennokkien avulla kerättyihin, erittäin tiheisiin laserkeilausaineistoihin, joiden pulssitiheys on tyypillisesti vähintään satoja pulsseja per neliometri. Datankeruuyksikö on rakennettu yrityksen sisällä, ja sitä voidaan käyttää useassa eri lennokkimallissa. Kerätyt aineistot prosessoidaan automaattisesti pilvessä.

Päämenetelmä on yksinpuintulkinta. Pistepilvistä puut segmentoidaan ja luokitellaan käyttäen moderneja koneoppimismenetelmiä. Jokaiselle puulle arvioidaan keskeisiä ominaisuuksia kuten läpimitta, pohjapinta-ala, pituus, puulaji sekä tilavuudet puutavaralajeittain. Puut luokitellaan neljään eri luokkaan; mänty, kuusi, koivu ja haapa. Raudus- ja hieskoivua ei toistaiseksi eroteta toisistaan. Lisäksi luokittelijaan sisältyy tuntematon luokka muille puulajeille sekä epävarmoille luokituksille. Pituus arvioidaan automaattisesti normalisoidusta pistepilvestä. Tukki-, kuitu- ja energiapuutilavuus mallinnetaan hyödyntäen puukohtaisia piirteitä.

Perinteiseen aluepohjaiseen laserkeilausmenetelmään (ABA) verrattuna lisäarvoa saadaan tarkemmasta, yksittäisen puun tasolla saatavasta tiedosta. Puutason tiedosta voidaan laskea edelleen aluetason tunnuksent kuo- ja tilatasolle. Perinteisen yksinpuintulkintamenetelmän ongelmana on ollut se, että kaikkia puita ei löydetä, mikä aiheuttaa merkittävästi virhettä (Vastaranta ym. 2011). Tämä on osaltaan hidastanut yksinpuintulkintamenetelmän käyttöönottoa verrattuna aluepohjaiseen menetelmään, joka puolestaan on yleistynyt nopeasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Silveren menetelmässä tätä riskiä pyritään merkittävästi vähentämään aiempaa tiheämmän pistepilven ja aiempaa parempien luokitusmenetelmien avulla. Tyypillinen "tiheäpulsinen" ALS-aineisto on korkeimmillaan muutamia kymmeniä pulsseja neliometrillä, kun Silveren inventaariossa käytetään vähimmillään satoja pulsseja neliometrille. Lisäinformaation ansiosta myös tarkkuutta voidaan ratkaisevasti parantaa. Tarkemman tiedon avulla voidaan Silvere pyrkiä lisäksi ratkaisemaan monia muita keskeisiä ongelmia, kuten esimerkiksi taimikoiden hoitotarpeen, puulajiosuuksien, puuston laadun ja läpimittajakaumien arviointia, jotka yleisesti tiedostetaan perinteisen laserkeilausmenetelmän keskeisiksi ongelmiksi (esim. Kangas ym. 2019).

Inventaariomenetelmän suurimmat rajoitteet liittyvät luonnonoloihin, kuten epäsuotuisiin sääolosuhteisiin tai esimerkiksi lumipeitteeseen, mitkä estävät hyvälaatuisen datan tuottamisen. Samat rajoitteet kuitenkin koskevat pääosin myös vaihtoehtoisia

menetelmiä. Menetelmän tarkkuus myös vaihtelee metsikön rakenteesta johtuen, aineisto on tarkimmillaan tasajaksoisissa, varttuneissa metsissä. Nuoret, alle 4 metriset taimikot sekä kaksijaksoiset ja eri-ikäisrakenteiset metsät vaativat vielä parannuksia, joita kehitetään paraikaa.

Silveren menetelmän etu perinteisiin keilauksiin verrattuna on se, että toistuvia mittauksia voidaan tehdä joustavasti, mikä mahdollistaa esimerkiksi puuston kasvun seurannan erittäin tarkasti. Perinteisen ALS-menetelmän inventointikierto on uudessa laserkeilaussuunnitelmassa 6-12 vuotta, kun taas Silveren menetelmää käytettäessä tämä voidaan tehdä koska vain.

5.5 GeoSLAM maastokeilain

DigiInventory-hankkeen maastokampanjassa eri menetelmin inventoitua testileimikkoa päätettiin hyödyntää myös uuden sukupolven SLAM-käsikeilaimen (Simultaneous Localization And Mapping) testaamiseen. Kyseistä teknologiaa on käytetty etenkin rakennetussa ympäristössä, mutta hankkeessa tehtyjen testien tarkoituksena oli ensisijaisesti selvittää, miten laite soveltuisi esimerkiksi metsäpalveluyrittäjän tuottaman puustoinventointipalvelun työkaluksi.

SLAM-teknologian hyödyntäminen on mahdollistanut sisätilojen pistepilvien liikkuvan kartoituksen kohteissa, joissa ei voida käyttää satelliittipaikannusta. SLAM-tekniikassa mittauslaitteen keräämää aineistoa käytetään samanaikaisesti sekä laitteen paikantamiseen tilassa (localisation) että tilan kartoitukseen (mapping). SLAM-teknologiassa algoritmit hyödyntävät sensoreista saatavaa informaatiota (LiDAR -light detection and ranging tai kuva) arvioimaan kulkuvälineen sijaintia ja kartoittamaan ympäristöä. GeoSLAM-teknologia perustuu LiDAR-sensorin dataan sekä IMU-teknologiaan. IMU (Inertial Measurement Unit) määrittää tarkan sijainnin ja luo pistepilven. Sekä kulkuradan laskentaa että laseraaltoa käytetään sovittamaan pistepilvet yhteen, korjaamaan ja tasoittamaan tietoa. Tulosta optimoi se, että kulkureitti päättyy aloituskohtaan.

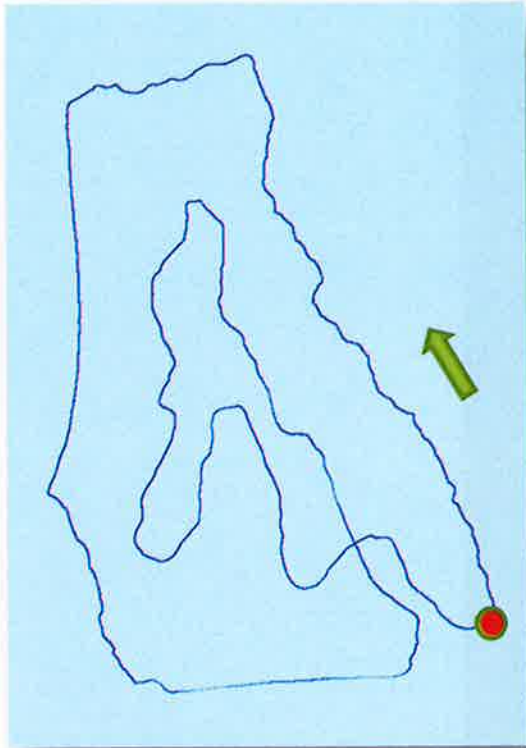
Laite, GeoSLAM ZEB Horizon 3D, on kevyt, nopeasti käyttövalmis ja helposti operoitava (Kuva 5). Laite kerää 300 000 pistettä sekunnissa <3 cm:n tarkkuudella, joten sen käyttö soveltuu moniin sovelluksiin. Skanneria pidetään mittaamisen aikana kädessä (Kuva 6). Akku ja datankeräysyksikkö kulkevat mukana olkalaukussa. Keilain voidaan tarvittaessa myös asentaa reppuun tai selkätelineeseen.



Kuva 5. GeoSLAM ZEB Horizon 3D käyttövalmiina.

Skannattu data siirretään loggerilta USB-muistitikulla tietokoneelle. GeoSLAM Hub – ohjelmistolla datasta generoidaan pistepilvi. Yhden leimikon datan prosessointi pistepilveksi kestää tyypillisesti muutaman tunnin. Tiedostokoon pitämiseksi maltillisena suositellaan, että yksittäinen skannaus olisi enintään 35 minuutin pituinen.

Leimikko kierrettiin ulkoreunoja pitkin ja sitten tehtiin silmukka kuvion sisällä. Lopuksi palattiin lähtöpisteeseen (Kuva 6). Tämän, n. 1 hehtaarin leimikon skannaus kesti vain noin 15 minuuttia valmisteluineen.



Kuva 6. Vasen: ZEB Horizon keilaimen kanssa kuljettu maastoreitti Keuruulla. Oikea: Keilaus maastossa.

Koska kyseisen laitteen valmistajalla ei ole tulosten analysointiin soveltuvaa ohjelmistoa, jolla saataisiin laskettua puuston tilavuuksia, valittiin vertailusuureiksi puun rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Jotta saatiin riittävä määrä koepuita, tässä tapauksessa 30, ZEB Horizonilla keilattiin myös toinen leimikko Saarijärvellä, sillä ensimmäinen päätehakkuleimikko oli jo päätehakattu.

5.6 Hakkuukoneiden keräämät mittaustiedot

Hakkuukoneista saatiin hakkuun yhteydessä kerätyt ainespuutiedot. Kuljettajia oli myös pyydetty tallentamaan mittauskoepuut erillisiin tiedostoihin, jotta voitiin verrata yksittäisten runkojen mittauksia mm. maastolaserin tuloksiin. Ainespuutietoja käytettiin referenssinä vertailtaessa eri mittausmenetelmien eroja puuston tilavuuden suhteen.

Koepuut mitattiin manuaalisesti kaadon yhteydessä, joten niiden vertailussa käytettiin käsimittausta referenssinä. Käsimitaus on tarkempi, koska hakkuukone ei mittaa runkoa latvaan asti eikä koneen mittalaitetta kalibroida joka kerta hakkuun alussa.

5.7 Metsäkeskuksen yksityismetsien metsävaratieto

Metsäkeskus kerää metsävaratietoa kaukokartoituksen avulla. Keruujärjestelmä perustuu laserkeilaukseen, ilmakuvaukseen ja koealamittauksiin. Aiemmin vastaavat tiedot kerättiin silmävaraisesti maastossa arvioiden.

Yksityismetsien metsävaratiedon yhdistelmä sisältää tietoa metsätalousmaan jakaumasta, puuston määrästä ja kasvusta, kehitysluokkajakaumasta sekä tietoa metsänhoitotarpeista ja hakkuumahdollisuuksista. Metsäkeskuksen lakisääteinen tehtävä ja pääpaino on yksityismetsissä, mutta perusinventointitietoa on tuotettu viime vuosina kaikista metsistä omistajaryhmästä riippumatta, joten uuden keilauskierroksen jälkeen tämän vuosikymmenen puolivälissä metsävaratieto kattaa kaikki Suomen metsät. Metsävaratieto on nykyisin myös julkista, mutta avoimen tiedon yhteydessä ei luovuteta metsänomistajien henkilö- tai yhteystietoja.

Tutkimusalueet laserkeilattiin kesäkuussa 2018 ja 2019, joten näin hankittu yleinen metsävaratieto on verraten uutta. Metsäkeskuksen toimesta vuoden 2018 tiedot päivitettiin laskennallisesti leimikkokohtaisiksi.

5.8 Koepuut

Saarijärven päätehakuuleimikosta valittiin satunnaisesti leimikon keskiosasta 30 koepuuta, joiden rinnankorkeusläpimitan maksimi ja minimi mitattiin ja laskettiin niistä kullekin puulle keskiarvoläpimitta. Samassa yhteydessä mitattiin niiden pituus hypsometrillä. Tarkka puiden pituus mitattiin mittanauhalla vasta hakkuukoneen kaadettua puut päätehakuussa.

Leimikko skannattiin sekä ZEB Horizonilla että Silveren menetelmällä (drone- ja maastoskannaus), jolloin leimikosta saatiin yksityiskohtainen 3D-malli. Tarkka puukartta tuotettiin Silveren aineiston perusteella. Näillä laitteilla ja menetelmillä saatujen koepuiden rinnankorkeusläpimittoja ja pituuksia verrattiin manuaalimittauksiin.

6. Optinen puiden mittaus

6.1 Tutkimusympäristö, mittauskohteet ja menetelmät

Puiden optiset mittaustestit sisälsivät seuraavat koesarjat:

- 3D-mittalaitteiden vertailu säännöllisen sylinterin ja puun läpimitan mittaamisessa
- Koepuiden rinnankorkeusläpimittojen ja lenkouksien mittaus
- Peitteisten koepuiden rungon näkyvyys ja rinnankorkeusläpimittojen määrittäminen

3D-mittalaitteiden vertailu

Sisätiloissa tehdyn mittalaittevertailun tavoitteena oli todentaa nykyisten kuluttajaluokan ja teollisten 3D-kameroiden tarkkuutta ja soveltuvuutta puun läpimitan mittaamiseen. Mukana vertailussa olivat kuluttajatasen laitteista Intel RealSense D415 (Kuva 7 a) ja StereoLabs ZED (Kuva 7 b), teollisista kameroista IFM 03X100 (Kuva 7 c) ja ZEB Horizon kannettava laserskanneri (Kuva 5) sekä tutkimuslaitteista VTT:n SPAD-LiDAR koelaitteisto (Kuva 10). Mittalaitetestit tuottivat vertailudataa kontrolloidussa ympäristössä eri kuvanmuodostusteknologioilla mukaan lukien aktiivinen stereokamera (Intel RealSense), passiivinen stereokamera (StereoLabs ZED), valon kulkuaikaa mittaava syvyyskamera eli Time-of-Flight (ToF) kamera (IFM 03X100), kartoittava laserkeilain (ZEB Horizon) sekä tilastolliseen yksifotonilaskentaan perustuva mittalaite (VTT SPAD-LiDAR).

VTT SPAD-LiDAR on kokeellinen yksifotonilaskentaan perustuva mittalaitteisto, joka on koottu kaupallisesti saatavista komponenteista, instrumenteista ja mittalaitteista. Sen pääosat ovat

pulssitettu laser (PicoQuant), yksifotoni-ilmaisimena toimiva näkyvän alueen detektori (SPAD, Aurea Technology), X-Y -skannauksen tekevä galvanometrinen skanneri (Cambridge Technology), digitaalinen pulssi- ja viivegeneraattori (Stanford Research Systems) ja laitteistoa ohjaava tietokone. Laitteisto rakennettiin ilmakumirenkaisen vetokärryn päälle liikuteltavuuden mahdollistamiseksi.



a)

b)

c)

Kuva 7. a) Intel RealSense syvyyskameraita, b) StereoLabs ZED syvyyskamera ja c) IFM O3X100 ToF-kamera.

Mittauskohteina laitevertailussa käytettiin kuusitukista sahattua n. 50 cm mittaista ja läpimitaltaan n. 20 cm pölkkyä (Kuva 8 a) sekä säännöllistä pahvista valmistettua sylinteriputkea (Kuva 8 b). Kohteet mitattiin kaikilla edellä mainituilla mittalaitteilla ja kohteiden läpimitat määritettiin sovittamalla sylinterimalli pölkyn kuoren päältä ja sylinteriputkesta mitattuihin 3D-pisteisiin. Pistedatasta määritettyjä läpimittoja verrattiin saksilla mitattuihin läpimittoihin. Koska pölkky oli muodoltaan epäsäännöllinen ja läpimitan tarkan arvon määrittäminen hankalaa, laitteiden absoluuttista tarkkuutta arvioitiin mittaamalla säännöllisen sylinteriputken läpimitta.



a)



b)

Kuva 8. Mittalaittevertailun kohdekappaleet a) sahattu kuusipölkky ja b) säännöllinen sylinteriputki.

Koepuiden rinnankorkeusläpimittojen ja lenkouksien määrittäminen

Puuston laatuparametrit, eli rinnankorkeusläpimitat ja lenkoudet, määritettiin VTT:n Oulun toimipisteen lähellä olevan koemetsikön valituista koepuista. Koko koemetsikkö mitattiin kannettavalla ZEB Horizon laserkeilaimella ja valittuihin koepuihin kuuluvat 3D-pisteet leikattiin koko metsikön kattavasta pistepilvestä pienempiin erillisiin tiedostoihinsa (Kuva 9 a) ja Kuva 9 b). Valitut koepuut mitattiin myös yksitellen VTT:n SPAD-LiDAR koelaitteistolla (Kuva 10 a) ja Kuva 10. b). Koepuiden läpimitat mitattiin myös manuaalisesti mittasaksilla ja lenkous lankamittauksella. Lankamittauksessa lenkous määritettiin virittämällä lanka puun tyvipäästä n. 4 metrin korkeuteen ja mittaamalla langan suurin etäisyys rungon pinnasta. Manuaalimittauksen tuloksia verrattiin 3D-mittauksien tuloksiin. Lenkousohjeen (Metsäteho 1989) mukaan lenkous pitäisi määrittää rungon keskilinjasta, mikä on vaikea määrittää pystyssä olevasta puusta. Jos lenkous määritetään rungon kyljestä, kuten näissä kokeissa, aiheutuu pientä laskennallista virhettä keskilinjasta määritettyyn lenkouteen nähden. Koepuille tyypillisillä pituuksilla, läpimitoilla ja lenkouksilla laskennallinen virhe on kuitenkin niin pieni, n. 0,3 % (0,14 mm), ettei sillä vertailun kannalta ole merkitystä. Käytännössä tukin pinnan epäsäännölliset muodot kuten oksat, kaarnan kolot ja kohoumat aiheuttavat useita millimetrejä mittauserhettä lenkousarvoon.



a)



b)

Kuva 9. a) ZEB Horizon kannettavalla laserkeilaimella skannatun koemetsikön 3D-pistepilvi ja b) yksittäisen koepuun 3D-pisteet.



a)



b)

Kuva 10. a) Koepuun mittaamista VTT:n SPAD-LiDAR koelaitteistolla ja b) yksittäisestä koepuusta mitatut 3D-pisteet.

Peitteisten koepuiden mittaaminen ja läpimittojen määrittäminen

Laatuparametrien mitattavuutta oksiston läpi selvitettiin mittaamalla peitteisiä kuusia VTT:n SPAD-LIDARilla ja ZEB Horizonilla sekä sisätiloissa



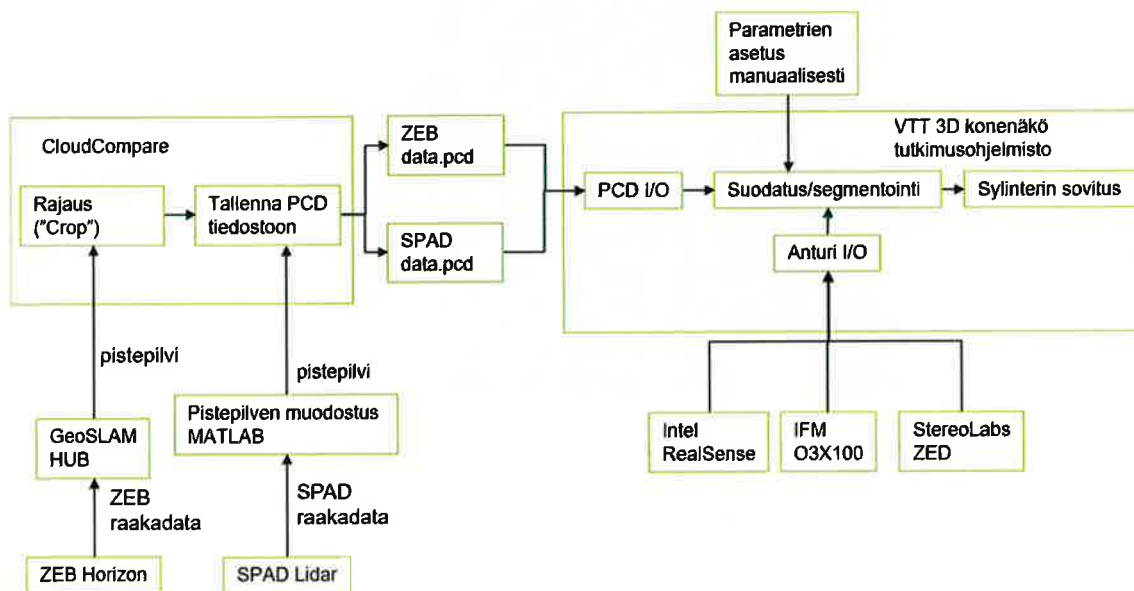
Kuva 11) että ulkona koemetsikössä (Kuva 10 a). Mittalaitteiden soveltuvuutta peitteisten puiden mittaamiseen arvioitiin runkoon kuuluvien pisteiden eroteltavuuden (segmentoitavuus) perusteella sekä rinnankorkeusläpimitan mittaustarkkuudella. Vertailuarvot läpimitoille määritettiin manuaalisesti mittasaksilla minimi- ja maksimiläpimitan keskiarvona.



Kuva 11. Sisätiloissa mitattu peitteinen kuusi.

Pistedatan käsittely

Eri laitteilla mitatun pistedatan prosessoinnin vaiheet ovat esitetty kuvassa (Kuva 12). Pistepilven muodostus ZEB Horizon ja SPAD LiDAR mittalaitteilla edellytti kerätyn raakadatan ei-reaaliaikaista esilaskentaa. ZEB Horizonin mittaama raakadata käsiteltiin GeoSLAM Hub ohjelmistolla ja SPAD LiDARin raakadata VTT:n kehittämällä MATLAB-sovelluksella. Pistepilven analyysiin ja puustoparametrien laskentaan käytettiin VTT:n 3D-konenäköohjelmistoa, johon voidaan ladata pistepilvidatan sisältävät tiedostot Point Cloud Data (PCD) formaatissa. Pistepilvien leikkaaminen ja tiedoston formaatti muunnettiin avoimen lähdekoodin CloudCompare -ohjelmistolla. Muilta testatuilta 3D-mittalaitteilta Intel RealSense, IFM O3X100 ja StereoLabs ZED pistepilvi siirrettiin konenäön tutkimusohjelmistoon anturi I/O-liitännällä mahdollistaen lähes reaaliaikaisen mittaamisen ja kuva-analyysin n. 1 Hz taajuudella.



Kuva 12. Eri 3D-mittalaitteilta saadun pistedatan prosessoinnin vaiheet.

7. Tulokset ja niiden tarkastelu

7.1 Maastomittaustulosten vertailu

7.1.1 Koeleimikot

Koeleimikoiden vertailussa mukana on perinteisellä pystymittauksella (PM), hakkuukoneesta (Moto), Trestiman ja Silveren menetelmillä saadut puuston tilavuudet sekä julkiseen metsävaratietoon perustuva arvio (MK). On huomioitava, että leimikot hakattiin kasvukauden lopussa, kun taas mittaukset ja arvioinnit tehtiin sen puolivälissä. Heinäkuussa tapahtunutta puuston kasvua ei ole laskennallisesti lisätty taulukoihin. Saarijärven harvennusleimikon tapauksessa yleinen metsävaratieto kuitenkin sisälsi vuoden 2018 kasvun, koska laserkeilausaineisto oli tämän leimikon osalta vanhempaa. Kasvu on laskettu Metsäkeskuksen toimesta heidän käyttämiensä kasvumallien mukaan. Yleinen metsävaratieto ja Trestima eivät erotelleet koivua ja muita lehtipuita vaan ne laskettiin kaikki 'koivu' -sarakeeseen. Poistuma on harvennuksella laskettu ennen ja jälkeen hakkuuta tehtyjen mittausten erotuksena.

Päätehakuilla kokonaisinventointituloksista on vähennetty säästöpuut Metsäkeskuksen yleistä metsävaratietoa lukuun ottamatta. Hakkuukoneen hakkuutiedot on luonnollisesti ilmoitettu sellaisenaan.

Taulukko 2. Runkoluvut (kpl/kuvio) eri mittausmenetelmillä

Kohde	Menetelmä	Yhteensä	Mänty	Kuusi	Koivu	Muu lp
Sjärvi ennen	MK	2304	1831	146	326	0
Sjärvi ennen	PM	2555	2227	161	127	41
Sjärvi ennen	Silvere	2479	2200	162	117	0
Sjärvi ennen	Trestima	2301	1749	59	493	0
Kohde						
Kohde	Menetelmä	Yhteensä	Mänty	Kuusi	Koivu	Muu lp
Sjärvi poistuma	PM	1257	1098	146	45	29
Sjärvi poistuma	Moto	1346	1181	72	66	27
Sjärvi poistuma	Silvere	1215	1083	68	64	0
Sjärvi poistuma	Trestima	528	578	59	-109	0
Kohde						
Kohde	Menetelmä	Yhteensä	Mänty	Kuusi	Koivu	Muu lp
Keuruu poistuma	MK	692	72	582	38	0
Keuruu poistuma	PM	574	53	490	13	18
Keuruu poistuma	Moto	630	53	535	24	18
Keuruu poistuma	Silvere	573	45	485	43	0
Keuruu poistuma	Trestima	558	29	529	0	0
Kohde						
Kohde	Menetelmä	Yhteensä	Mänty	Kuusi	Koivu	Muu lp
Sjärvi pt poistuma	MK	682	114	522	46	0
Sjärvi pt poistuma	PM	619	126	443	49	1
Sjärvi pt poistuma	Moto	678	134	487	57	0
Sjärvi pt poistuma	Silvere	662	155	432	72	3
Sjärvi pt poistuma	Trestima	748	128	573	47	0

Kaikilla mittaustavoilla leimikoiden runkoluvut olivat lähellä toisiaan. Saarijärven harvennuskohteella muiden menetelmien runkoluvut jäivät pystymitasta 3-10 %. Suurimpia haasteita oli Trestimalla ja yleisellä metsävaratiedolla jaotella puulajit oikein. Molemmilla koivun (+muut lehtipuut) osuus oli lähes kolminkertainen todelliseen (PM) verrattuna. Sama koski myös poistuman runkolukua Trestiman arviota lukuun ottamatta. Se arvioi poistuneen runkoluvun vain hieman yli kolmannekseen todellisesta. Koivu ja lehtipuun osalta arvio meni jopa väärään suuntaan. Näitä ongelmia selittänee pitkulaisen leimikon keskelle pituussuunnassa avatut ajourat ja toisaalta kuvien liian vähäinen määrä. Varsinkin ajourien suuntaan olisi pitänyt ottaa enemmän kuvia, jotta poistuma olisi näkynyt selvemmin.

Päätehakuuleimikoilla runkolukujen erot olivat myös suhteellisen pieniä vaihdellen Keuruulla -3 % (Trestima) ja +21 (MK) välillä ja Saarijärvellä +7 (Silvere) -21(Trestima) % verrattuna pystymittaukseen. Pystymittauksen ja hakkuukoneen lukemien runkolukujen eroon on löydettävissä selkeä selitys. Ensinnäkin leimikon poistettavia puita ei leimattu etukäteen vaan ainoastaan leimikon rajat oli merkattu kuitunauhoin. Reunapuissa tulee tulkintatapauksia. Harvennuksella koneen kuljettaja tekee päätöksen, mitkä rungot poistetaan eikä se välttämättä täsmää pystymittaehdotuksen kanssa. Keuruulla oli paljon tykkylumen katkomia kuusia, joiden latvoista pystyi tekemään kuitupuuta. Tällöin ne tallennettiin erillisinä runkoina. Saarijärvellä päätehakuun yhteydessä mitattiin myös koepuita, jotka kaadettiin varsinaisen hakkuun yhteydessä. Ylimääräisiä käsittelyjä on tallentunut runkolukuun. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut metsikön puuston tilavuuden arviointiin.

Taulukko 3. Puuston pohjapinta-alat (m²/ha) eri mittausmenetelmillä.

Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ²	Mänty, m ²	Kuusi, m ²	Koivu, m ²	Muu lp, m ²
Sjärvi ennen	MK	23,1	19,8	1,5	1,8	0
Sjärvi ennen	PM	25,1	23,0	1,1	0,7	0,3
Sjärvi ennen	Silvere	26,0	24,0	1,4	0,7	0
Sjärvi ennen	Trestima	30,7	26,7	0,6	2,9	0,6
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ²	Mänty, m ²	Kuusi, m ²	Koivu, m ²	Muu lp, m ²
Sjärvi poistuma	PM	11,6	10,5	0,6	0,3	0,2
Sjärvi poistuma	Silvere	12,1	11,1	0,6	0,4	0
Sjärvi poistuma	Trestima	14,4	11,9	0,6	1,4	0,6
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ²	Mänty, m ²	Kuusi, m ²	Koivu, m ²	Muu lp, m ²
Keuruu poistuma	MK	33,2	3,7	28,3	1,2	0
Keuruu poistuma	PM	28,9	2,6	25,7	0,2	0,3
Keuruu poistuma	Silvere	29,0	2,8	26,0	1,0	0
Keuruu poistuma	Trestima	30,4	1,3	29,1	0	0
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ²	Mänty, m ²	Kuusi, m ²	Koivu, m ²	Muu lp, m ²
Sjärvi pt poistuma	MK	26,1	4,4	20,6	1,1	0
Sjärvi pt poistuma	PM	23,5	5,5	17,2	0,8	0
Sjärvi pt poistuma	Silvere	25,0	6,1	17,4	1,3	0,1
Sjärvi pt poistuma	Trestima	31,8	5,5	24,1	1,5	0,6

Puuston pohjapinta-ala-arviot olivat kaikissa tapauksissa pystymitalla ja Silveren menetelmällä hyvin lähellä toisiaan, Silverellä yliarviota vain 4–6 %. Trestima yliarvioi puuston kaikissa tapauksissa. Metsävaratiedossa hajontaa oli enemmän (-8 - +15 %).

Taulukko 4. Puuston kokonaistilavuus (m³/kuvio) eri mittausmenetelmillä.

Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ³	Mänty, m ³	Kuusi, m ³	Koivu, m ³	Muu lp, m ³
Sjärvi ennen	MK	268,6	233,8	16,8	18,0	0
Sjärvi ennen	PM	276,2	254,8	11,3	6,6	3,4
Sjärvi ennen	Silvere	295,1	274,1	13,8	7,2	0
Sjärvi ennen	Trestima	408,9	378	6,8	24,1	0
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ³	Mänty, m ³	Kuusi, m ³	Koivu, m ³	Muu lp, m ³
Sjärvi poistuma	PM	126,1	115,4	6	2,5	2,1
Sjärvi poistuma	Moto	125,9	117,1	5,1	2,2	1,5
Sjärvi poistuma	Silvere	137,7	127,2	6,4	4,1	0
Sjärvi poistuma	Trestima	204,3	184,9	6,8	12,7	0
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ³	Mänty, m ³	Kuusi, m ³	Koivu, m ³	Muu lp, m ³
Keuruu poistuma	MK	404,5	44,5	346,8	13,2	0
Keuruu poistuma	PM	380,8	34,0	340,1	4,0	2,7
Keuruu poistuma	Moto	383,6	31,0	345,7	4,1	2,8
Keuruu poistuma	Silvere	373,6	27,9	337,4	8,3	0
Keuruu poistuma	Trestima	341,7	12,5	329,2	0	0
Kohde	Menetelmä	Yhteensä, m ³	Mänty, m ³	Kuusi, m ³	Koivu, m ³	Muu lp, m ³
Sjärvi pt poistuma	MK	414,9	69,4	329,6	15,8	0
Sjärvi pt poistuma	PM	389,3	93,4	283,9	11,8	0,2
Sjärvi pt poistuma	Moto	387,6	91,9	283,7	11,9	0
Sjärvi pt poistuma	Silvere	394,2	96,0	279,4	18,0	0,7
Sjärvi pt poistuma	Trestima	438,9	76,6	346,3	16,1	0

Kuten olettaa sopii, pystymitan ja moton tilavuusluvut olivat hyvin lähellä toisiaan pystymitan erotessa vain -1 - +0,5 % motomitasta. Silveren menetelmä yliarvioi harvennusleimikon puuston n. 7 %, mistä johtui myös vastaava poistuman yliarvio (9 %). Päätehakuissa ero oli pienempi vaihdellen -2 - +1 % pystymitasta. Metsävaratiedon mukainen tilavuusarvio kullekin leimikolle oli myös verraten lähellä pystymitan tuloksia vaihdellen niistä -3 - +7 %. On huomioitava, että päätehakuiden poistumasta on vähennetty säästöpuut, jotka ovat metsävaratiedon 'poistumassa' (=päätehakkuun kokonaispuusto) mukana. Kaikkein suurimmat erot tulivat jälleen Trestima-mittauksilla. Yliarviota oli sekä Saarijärven harvennuksella (+62 %) että päätehakkuulla (+10 %) ja aliarviota Keuruulla (-10 %) (Taulukko 4).

Ensiharvennusleimikolla kaikkien vertailumenetelmien tukkiosuuden arvio poikkesi merkittävästi toteutuneesta hakkuukoneen suoritteesta. On myös huomattava, että poistuman tukkipuun määrä oli kokonaisuudessaan pieni verrattuna kuitupuuhun. Päätehakkuuleimikoilla hajonta oli vähäisempää ja siellä esimerkiksi Silveren ja Trestiman estimaatit olivat hakkuukoneen tukkiosuutta pienempiä (Taulukko 5).

Taulukko 5. Ainespuun osuudet (m³/kuvio) eri mittausmenetelmillä.

Kohde, harvennus	Menetelmä	Tukki yht. m ³	Mänty m ³	Kuusit m ³	Koivut m ³	Muu lpt m ³	Kuitu yht. m ³	Mäntyk m ³	Kuusik m ³	Koivuk m ³	Muu lpk m ³
Sjärvi ennen	MK	32,3	32,3	0	0	0	228,3	195,5	16,5	16,3	0
Sjärvi ennen	PM	30,6	29,0	1,3	0,3	0	232,0	214,6	9,0	5,3	3,1
Sjärvi ennen	Silvere	39,2	37,8	1,4	0,0	0	246,9	228,8	11,9	6,3	0
Sjärvi ennen	Trestima	155,2	155,0	0	0,2	0	240,5	211,8	5,8	22,9	0
Kohde, harvennus	Menetelmä	Tukki yht. m ³	Mänty m ³	Kuusit m ³	Koivut m ³	Muu lpt m ³	Kuitu yht. m ³	Mäntyk m ³	Kuusik m ³	Koivuk m ³	Muu lpk m ³
Sjärvi poistuma	PM	3,7	2,7	0,9	0,1	0	115,6	107,1	4,6	2,0	1,9
Sjärvi poistuma	Moto	7,8	7,8	0	0	0	111,3	103,7	4,6	1,8	1,3
Sjärvi poistuma	Silvere	15,8	15,2	0,7	0	0	117,3	108,1	5,5	3,6	0
Sjärvi poistuma	Trestima	93,3	93,2	0	0,1	0	104,0	86,0	5,8	12,2	0
Kohde, päätehakkuu	Menetelmä	Tukki yht. m ³	Mänty m ³	Kuusit m ³	Koivut m ³	Muu lpt m ³	Kuitu yht. m ³	Mäntyk m ³	Kuusik m ³	Koivuk m ³	Muu lpk m ³
Keuruu poistuma	MK	316,1	34,9	278,4	2,9	0	85,8	9,4	66,2	10,2	0
Keuruu poistuma	PM	313,1	28,2	283,2	1,7	0	62,0	5,4	51,9	2,2	2,5
Keuruu poistuma	Moto	288,1	21,7	266,2	0,2	0	89,8	8,8	74,5	3,7	2,7
Keuruu poistuma	Silvere	274,4	20,2	252,4	1,8	0	97,3	7,6	83,5	6,1	0
Keuruu poistuma	Trestima	237,7	7,3	230,4	0	0	98,7	4,9	93,9	0	0
Kohde, päätehakkuu	Menetelmä	Tukki yht. m ³	Mänty m ³	Kuusit m ³	Koivut m ³	Muu lpt m ³	Kuitu yht. m ³	Mäntyk m ³	Kuusik m ³	Koivuk m ³	Muu lpk m ³
Sjärvi poistuma	MK	325,5	54,5	268,0	3,0	0	79,9	13,5	53,6	12,9	0
Sjärvi poistuma	PM	314,7	78,0	232,6	4,1	0	68,8	14,3	47,0	7,3	0,2
Sjärvi poistuma	Moto	331,0	77,5	251,4	2,1	0	50,7	13,4	27,9	9,4	0,0
Sjärvi poistuma	Silvere	287,1	72,3	211,7	3,7	0,2	104,0	23,3	66,4	13,8	0,5
Sjärvi poistuma	Trestima	237,5	44,4	190,5	2,6	0	195,6	31,2	151,7	13,0	0

7.1.2 Saarijärven leimikon koepuut

Saarijärven koeleimikko skannattiin ZEB Horizon mittalaitteella ja leimikosta valittiin tarkempaan analyysiin 30 koepuuta, joiden sijainti georeferoidussa pistepilvessä määritettiin puiden GPS-koordinaattien perusteella (Kuva 13). Koepuut leikattiin koko leimikon kattavasta pistepilvestä erillisiin tiedostoihin ja puiden läpimitat ja pituudet määritettiin pistedatasta kuvan (Kuva 12) mukaisilla ohjelmistoilla. Puiden läpimitat ja pituudet mitattiin maastossa mittasaksilla ja hypsometrillä ja arvoja verrattiin 3D-mittauksella saatuihin arvoihin.

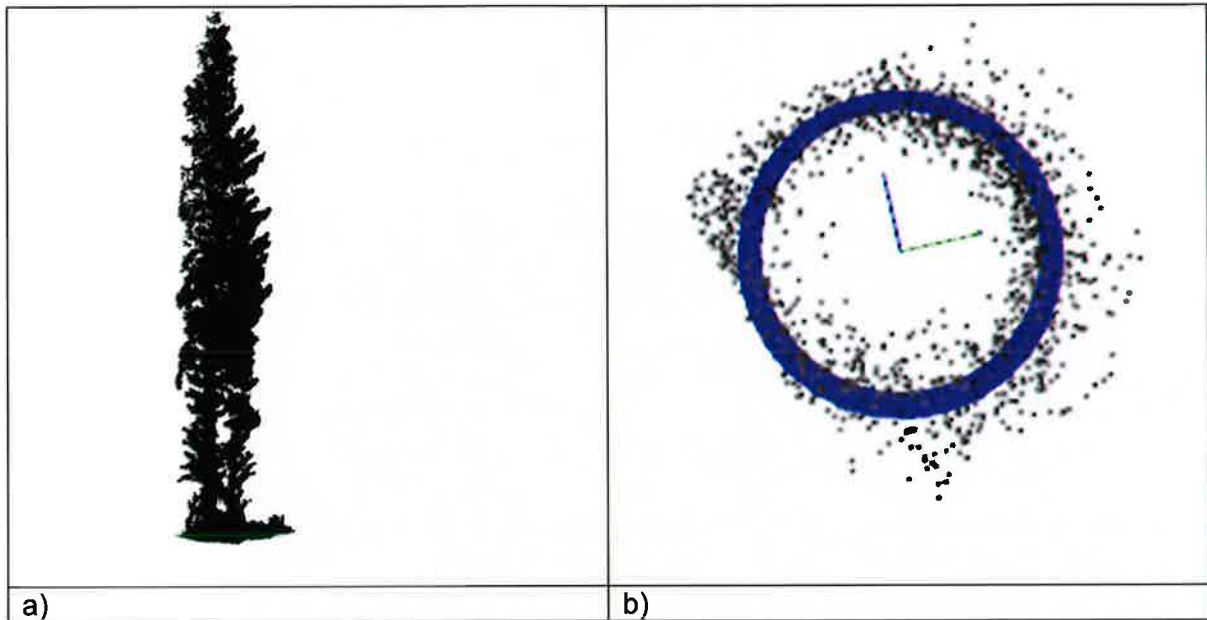
Taulukko 6. Saarijärven koepuiden rinnankorkeusläpimitat ja pituudet.



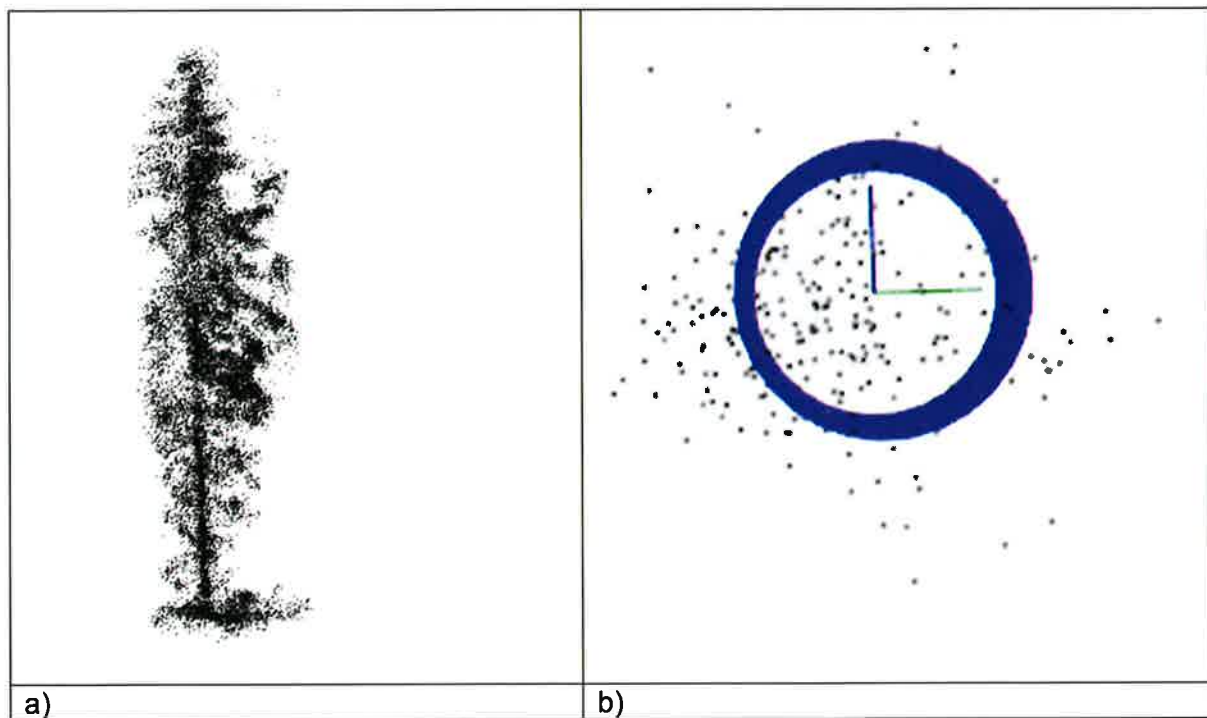
Kuva 13. Yleiskuva koealan kattavasta raakadatasta ja koepuista sisältäen n. 179 miljoonaa 3D-pistettä.

Näytejoukossa havaittiin olevan hyvälaatuisia ja huonopilaatuisia mittauksia koepuista. Hyvälaatuisessa mittauksessa rinnankorkeudelta puun runkoa irti leikattu pistejoukko jakaantui selvästi rungon pintakerrokselle eikä puun keskilinjalla ei ollut lainkaan 3D-pisteitä (Kuva 14). Huonolaatuisen pistedatan tapauksessa pisteiden jakaumasta ei voinut erottaa puun pintakerrosta ja sylinterimallin sovitus tällaiseen pistejoukkoon oli virhealtista (Kuva 15). Huonolaatuista 3D-pistedataa sisältäneet koepuut on korostettu punaisella värillä taulukossa

Taulukko 6. Saarijärven koepuiden rinnankorkeusläpimitat ja pituudet. Huonolaatuisissa näytteissä tyypillisesti joko rinnankorkeusläpimitan absoluuttinen tai suhteellinen ero maastomittaukseen oli suurempi kuin hyvälaatuisissa koepuumittauksissa.



Kuva 14. Esimerkki hyvälaatuisesta koepuusta mitatusta 3D-pistedatasta.



Kuva 15. Esimerkki huonolaatuisesta koepuun pistedatasta

Kuva 16 sisältää ZEB Horizonin mittausreitit korostettuna vihreällä viivalla ja huonolaatuisia pistedataa sisältäneiden koepuiden sijainti ympäröitynä punaisella. Kuvasta nähdään, että neljä huonolaatuisia koepuuta oli suhteellisen kaukana mittausreitistä, yli 10 metrin etäisyydellä, mikä saattoi mahdollisesti heikentää mittauksen laatua. Kaksi muuta koepuuta kuvan vasemmassa reunassa olivat lähempänä mittausreittiä ja näiden koepuiden osalta mittauksista saattoi häiritä peitteinen aluskasvillisuus.



Kuva 16. ZEB Horizonin mittausreitti (vihreä viiva). Huonolaatuiset mittaukset on ympyröity punaisella.

Saarijärven koepuiden maastossa mitatut ja 3D-pistedatasta määritetyt rinnankorkeusläpimitat ja pituudet ovat taulukossa 6.

Tuloksien perusteella 3D-pistedatasta määritetyt puiden pituudet ovat suhteellisesti tarkempia kuin läpimitat, kun tarkastellaan eroa maastomittauksessa määritettyihin arvoihin. Läpimitoissa 3D-mittauksen absoluuttinen ero maastomittaukseen mukailee ZEB Horizonille ilmoitettua mittaustarkkuutta 1 - 3 cm. Joidenkin koepuiden kohdalla absoluuttinen ero pituudessa oli huomattavasti suurempi, jopa yli 50 cm, mutta koska suurin osa puista oli yli 20 metriä pitkiä, suhteellinen ero maastomittaukseen oli melko pieni.

Valon kulkuajan mittauksessa etäisyys ei juurikaan vaikuta absoluuttivirheeseen. Tämä on todennäköisin syy, minkä takia suhteellinen ero maastomittaukseen pitkillä yli 10 metrin etäisyyksillä oli pienempi kuin läpimittoja vastaavilla alle metrin etäisyyksillä. Puun pituuden luotettava 3D-mittaus edellyttää, että puun latvaan on hyvä näkyvyys ja pisteitä saadaan mitattua myös aivan latvan ylimmistä osista.

Koepuiden 3D-mittauksesta määritettyjen läpimittojen keskivirhe maastomittaukseen verrattuna oli 0,81 %, mutta yksittäisten koepuiden läpimitat saattoivat erota useita senttejä maastomittauksen arvosta. ZEB Horizonilla kerätty pistedata näyttäisi siis soveltuvan paremmin koko leimikon puumäärän arviointiin, mutta yksittäisten puiden läpimitoista ei välttämättä saada riittävän tarkkaa tietoa.

Taulukko 6. Saarijärven koepuiden rinnankorkeusläpimitat ja pituudet.

Koepuu no	3D	Maasto- mittaus			3D	Maasto- mittaus			Silvere Pituus [m]
	D_1,3 [cm]	D_1,3 [cm]	D_1,3 Ero [cm]	D_1,3 Ero [%]	Pituus [m]	Pituus- mittaus Pituus [m]	Pituus- ero [m]	Pituus- ero [%]	
1	27,6	25,1	2,5	10,0 %	23,8	24,69	-0,89	-3,6 %	24,12
2	34,2	35,6	-1,4	-3,8 %	24,4	24,92	-0,52	-2,1 %	25,25
3	18,4	20,6	-2,2	-10,5 %	20,0	19,95	0	0,0 %	20,25
4	23,4	26,1	-2,7	-10,2 %	21,6	21,72	-0,12	-0,6 %	22,25
5	18,0	14,5	3,5	24,6 %	13,0	12,97	-0,02	-0,2 %	12,75
6	40,6	41,8	-1,2	-2,8 %	25,6	25,85	-0,25	-1,0 %	26,25
7	23,8	19,6	4,2	21,7 %	20,9	21,21	-0,31	-1,5 %	21,25
8	20,4	21,1	-0,7	-3,3 %	19,3	19,34	-0,04	-0,2 %	19,65
9	27,2	29,0	-1,8	-6,2 %	22,1	22,24	-0,14	-0,6 %	22,25
10	31,2	30,8	0,4	1,5 %	20,6	20,56	0,04	0,2 %	21,20
11	22,6	22,0	0,6	2,7 %	21,9	19,78	2,12	10,7 %	20,25
12	29,2	29,2	0,0	0,2 %	23,8	23,62	0,18	0,8 %	23,78
13	21,0	23,5	-2,5	-10,4 %	20,1	20,34	-0,24	-1,2 %	20,36
14	27,8	25,0	2,8	11,4 %	25,0	25,16	-0,16	-0,6 %	25,20
15	23,8	9,0	14,8	164,4 %	9,1	9,10	0	0,0 %	9,25
16	23,6	21,3	2,3	10,8 %	21,8	21,83	-0,03	-0,1 %	22,69
17	51,8	59,8	-8,0	-13,3 %	28,7	28,16	0,54	1,9 %	29,23
18	54,4	59,7	-5,3	-8,8 %	29,9	30,55	-0,65	-2,1 %	30,25
19	29,8	31,9	-2,1	-6,4 %	27,0	26,95	0,05	0,2 %	27,25
20	23,2	23,0	0,2	0,9 %	20,6	20,88	-0,28	-1,3 %	21,25
21	26,8	27,9	-1,1	-3,9 %	26,4	26,59	-0,19	-0,7 %	26,75
22	11,7	11,1	0,6	5,9 %	14,5	15,33	-0,83	-5,4 %	15,25
23	21,4	22,5	-1,1	-4,7 %	22,6	22,51	0,09	0,4 %	22,60
24	37,0	37,1	-0,1	-0,3 %	24,0	23,95	0,05	0,2 %	24,34
25	48,6	47,8	0,8	1,8 %	28,8	29,06	-0,26	-0,9 %	28,86
26	27,4	26,0	1,4	5,6 %	20,6	20,75	-0,15	-0,7 %	20,86
27	29,4	30,6	-1,2	-3,9 %	24,1	23,92	0,18	0,8 %	24,25
28	31,0	27,1	3,9	14,4 %	22,7	22,08	0,62	2,8 %	23,11
29	27,6	29,3	-1,7	-5,6 %	23,0	23,50	-0,50	-2,1 %	23,75
30	17,8	16,7	1,1	6,6 %	21,1	21,00	0,10	0,5 %	21,25
		keskivirhe	0,23	0,81 %			-0,05367	-0,22	

7.1.3 3D-mittalaitteiden vertailu

Puun läpimitan määrittäminen

Kuva 17 kuvaa eri laitteilla vertailun kohdekappaleena toimineesta pölkystä mitatut raakapistepilvet. Intel RealSense ja StereoLabs ZED tuottavat värillisen pistepilven, kun muut laitteet tuottavat yksiväristä pistedataa. 3D-pisteiden väri-informaatiota ei hyödynnetty pistedatan käsittelyssä ja läpimitan määrittäminen perustui pelkästään 3D-pisteiden

koordinaattiarvoihin. Kohde mitattiin vain yhdestä suunnasta. Kuvista Kuva 17 a), b), c) ja e) nähdään, kuinka kohteen takaa puuttuu pisteitä, johtuen katveesta mittaussuuntaan nähden. ZEB Horizonilla mitatussa datassa (Kuva 17 d) katve ei tule esille yhtä selvästi, koska käsiskannerissa oli pyörivä laserkeilain ja mittaus tehtiin käsivaralta samalta paikalta. Kuva 18 d) kuitenkin osoittaa, että pölkyn pinnasta mitattiin pisteitä vain yhdeltä puolelta.



a)



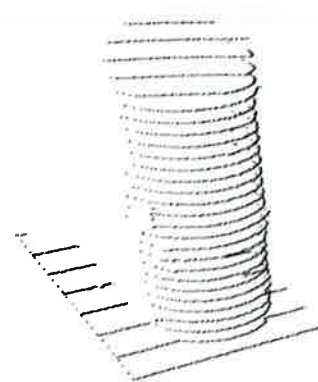
b)



c)



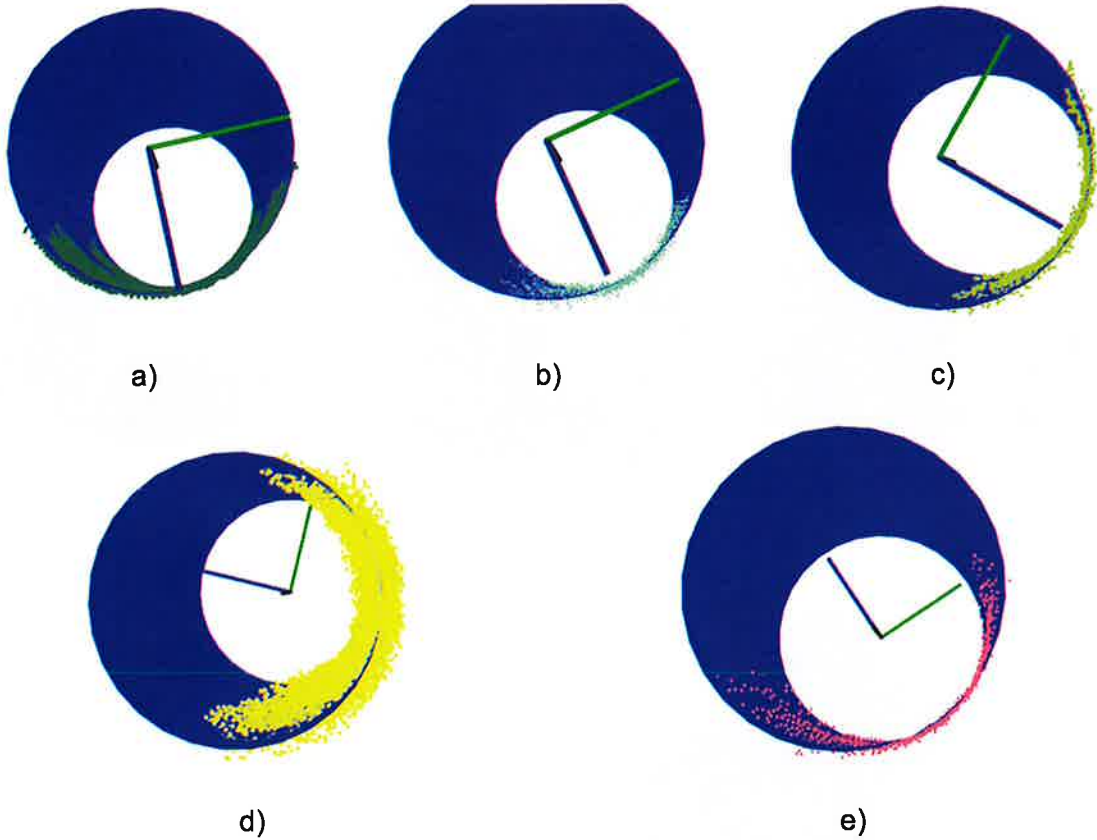
d)



e)

Kuva 17. Kuusipölkystä mitattu raakadata eri mittalaitteilla: a) Intel RealSense, b) StereoLabs ZED, c) IFM O3X100, d) ZEB Horizon ja e) VTT SPAD LiDAR.

Kuva 18 esittää pölkyn pinnasta mitatut 3D-pisteet ja niihin sovitetun sylinterimallin, joka minimoi pistejoukon etäisyyksien neliösumman sylinterimallin vaipasta. Kuvasta d) nähdään ZEB Horizonin pistedatan selvästi muita laitteita suurempi tilastollinen hajonta, joka mukailee valmistajan ilmoittamaa 1 cm - 3 cm mittaustarkkuutta.



Kuva 18. Sovitettu sylinterimalli 3D-pisteisiin sylinterin akselin suunnasta katsottuna a) Intel RealSense, b) StereoLabs ZED, c) IFM O3X100, d) ZEB Horizon ja e) VTT SPAD LiDAR.

Vertailuarvo 3D-mittauksilla saaduille läpimitoille määritettiin mittasaksilla puolivälistä pölkkyä (Kuva 19). Saksilla määritetty läpimitta oli pölkyn minimi- ja maksimiläpimitan keskiarvo.



Kuva 19. Vertailuarvo läpimitalle määritettiin mittasaksilla noin puolivälistä pölkkyä.

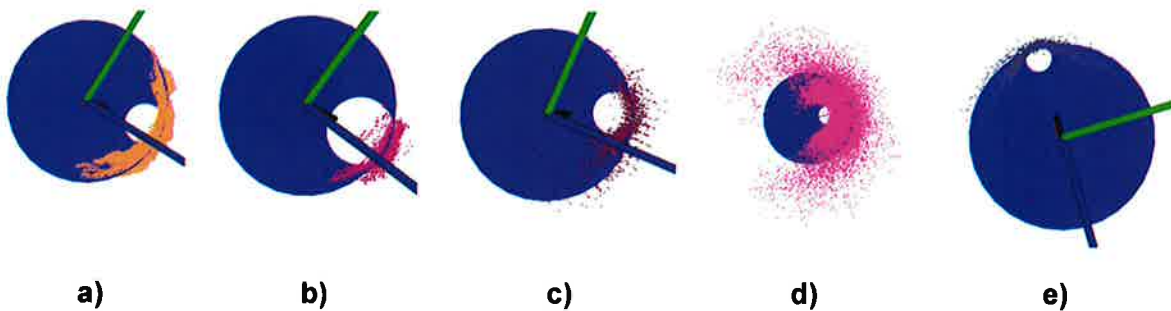
Eri mittalaitteilla määritetyt läpimitat ovat taulukossa Taulukko 7. Määritettyjen läpimittojen vaihteluväli oli 3,5 cm. Pienin arvo läpimitalle saatiin ZEB Horizonilla ja suurin läpimitta IFM O3X100 ToF kameralla. Lähimpänä saksilla määritettyä läpimitan arvoa oli Intel RealSense D415 syvyyskameralla mitattu läpimitta.

Taulukko 7. Pölkyn läpimitta eri mittalaitteilla

Mittalaite	läpimitta
Intel RealSense D415	20,6 cm
ZEB Horizon	19,2 cm
StereoLabs ZED	21,1 cm
IFM O3X100	22,7 cm
SPAD Lidar (VTT)	21,1 cm
Mittasakset	20,4 cm
Ka.	20,9 cm

Mittalaitteiden absoluuttitarkkuus

Laitteiden absoluuttitarkkuutta verrattiin mittaamalla yhdestä suunnasta säännöllinen sylinteriputki, jonka läpimitta oli 88 mm. Kuva 20 näyttää sylinteriputken pinnasta mitattuihin 3D-pisteisiin sovitetut sylinterimallit. Tässäkin tapauksessa ZEB Horizonin datassa (Kuva 20 d) oli nähtävissä selvästi suurempi tilastollinen hajonta verrattuna muihin mittalaitteisiin.



Kuva 20. Sylinterimallin sovitus sylinteriputkesta mitattuihin 3D-pisteisiin a) Intel RealSense, b) StereoLabs ZED, c) IFM O3X100, d) ZEB Horizon ja e) VTT SPAD LiDAR.

Taulukko 8 näyttää sylinteriputken läpimitat eri mittalaitteilla määritettynä, mittausvirheen ja mittausetäisyydet. Laitteiden Intel RealSense D415, StereoLabs ZED ja IFM O3X100 tapauksessa mittausetäisyys valittiin lähes optimaaliseksi ja näiden kameroiden tarkkuus on parhaimmillaan alle 1,5 m mittausetäisyyksillä. ZEB Horizonilla ja SPAD LiDAR:illa on mahdollista mitata kohteita huomattavasti kauempaa, kymmenien metrien päästä, eikä niiden mittausetäisyyttä erityisesti optimoitu tässä testissä. Intel RealSensella oli pienin mittausvirhe,

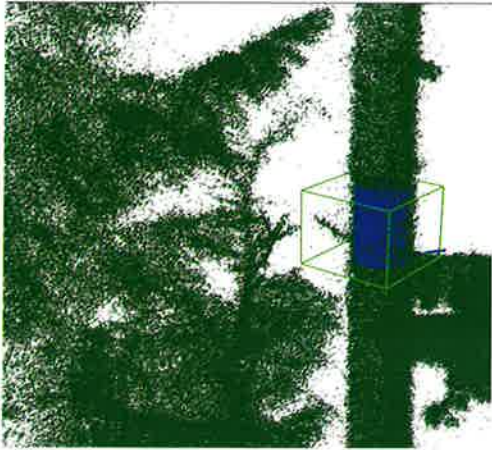
alle 0.5 mm, joka taulukossa pyöristetty nolnaan. SPAD LiDAR:illa läpimitalle saatiin +1 mm suurempi arvo ja muilla mittalaitteilla 7 mm - 8 mm oikeaa tulosta pienempi arvo.

Taulukko 8. Sylinteriputken läpimitan mittaustarkkuus.

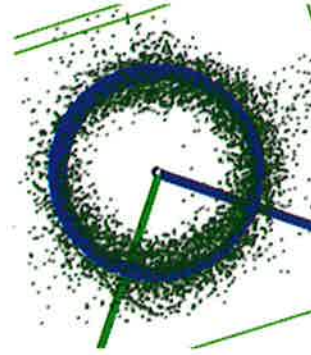
Laite	Läpimitta [mm]	Virhe [mm]	Mittausetäisyys [m]
<i>Intel RealSense D415</i>	88	0	1,1
<i>StereoLabs ZED</i>	80	-8	1,05
<i>IFM O3X100</i>	80	-8	1,05
<i>ZEB Horizon</i>	81	-7	3,5 m
<i>SPAD Lidar (VTT)</i>	89	+1	4,8 m

7.1.4 Rinnankorkeusläpimitan ja lenkouden määrittäminen

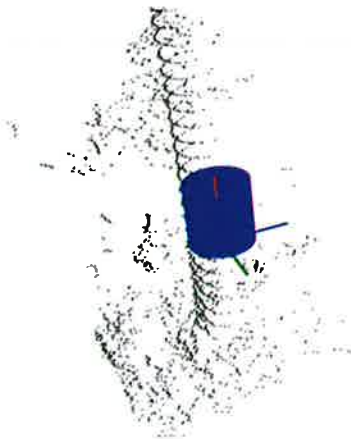
Selkeästi näkyvien koepuiden (= ei merkittävää peitteisyyttä) rinnankorkeusläpimitat ja lenkoudet määritettiin sekä ZEB Horizonilla että SPAD LiDAR:illa mitatuista pistedatoista sovittamalla sylinterimalli pitkin koepuista mitattuja rungon pisteitä (Kuva 21). Sylinterimallin sovituksen tehtiin sekä rinnankorkeusläpimitan määrityskorkeudelta (1,3 m) että 50 cm välein koepuiden tyvestä 4 metrin korkeuteen asti. Sylinterisovituksista saatiin näin ollen 9 kpl rungon keskilinjan pisteitä, joiden avulla laskettiin rungon lenkous eli keskilinjan pisteiden suurin etäisyys tukin tyvi- ja latvapään keskipisteitä yhdistävästä suorasta.



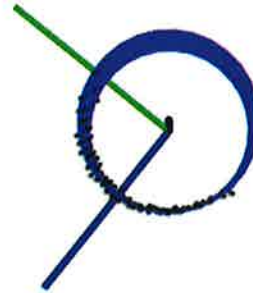
a)



b)



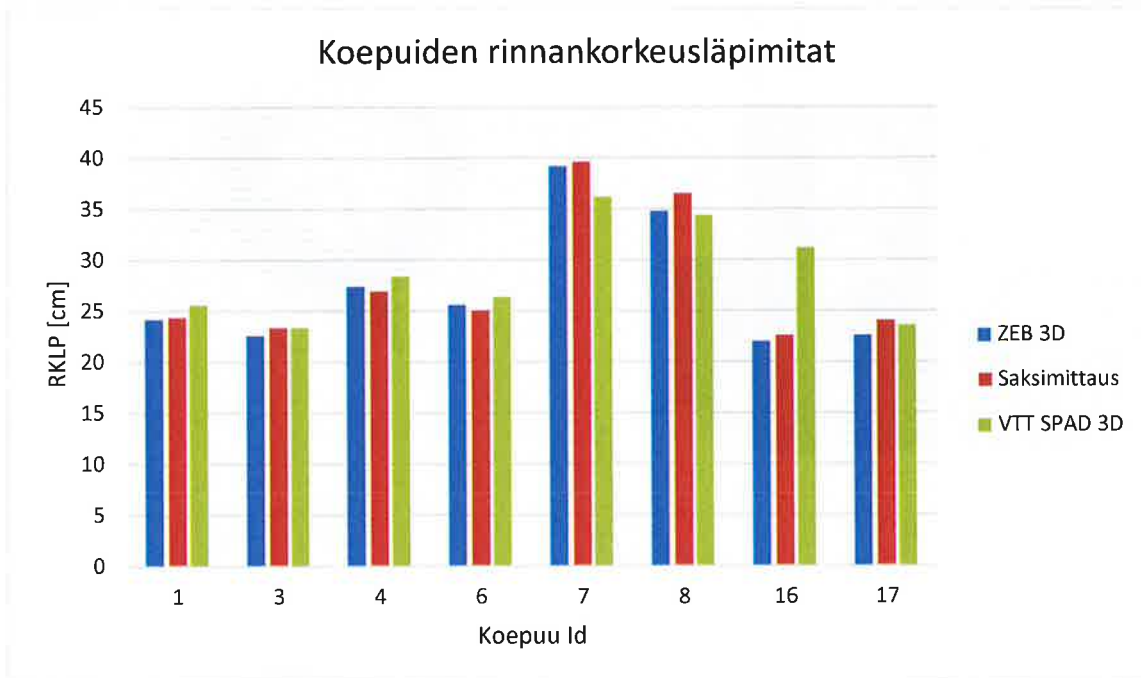
c)



d)

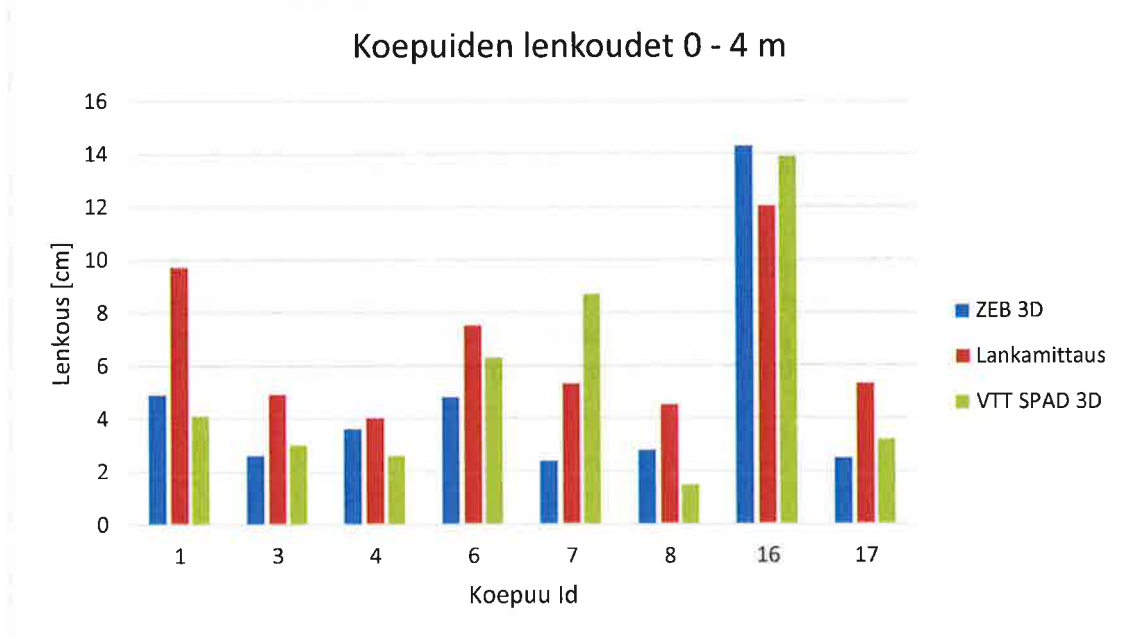
Kuva 21. Sylinterimallin sovitus koepuiden rungosta mitattuihin 3D-pisteisiin ZEB Horizon a) ja b) sekä SPAD LiDAR c) ja d).

Kuva 22. esittää ZEB Horizonilla, VTT SPAD LiDAR:illa ja saksimittauksella määritetyt rinnankorkeusläpimitat. Läpimitan vaihteluväli eri laitteiden kesken oli tyypillisesti noin 2 cm paitsi puun numero 16 kohdalla, joka oli erittäin lenko ja mittaussuunnasta poispäin kallistunut koivu. Muut koepuut olivat vähemmän lenkoja ja pystymmässä asennossa kasvavia mäntyjä.



Kuva 22. Koepuiden rinnankorkeusläpimitat eri mittalaitteilla.

Kuva 23 näyttää koepuiden lenkoudet eri mittausmenetelmillä määritettynä. Lenkousien vaihteluväli menetelmästä ja puusta riippuen oli tyypillisesti 2 cm - 6 cm. Suhteellisen suuri vaihteluväli indikoi, että lenkouden mittaaminen pystyista on erityisen altista mittausvirheille. Lisäksi näytejoukon, eli mittauskohtien, valinta aiheuttaa herkästi vaihtelua lenkouden määritykseen 3D-datasta.



Kuva 23. Koepuiden lenkoudet eri mittalaitteilla määritettynä.

7.1.5 Peitteisten koepuiden mittaaminen ja läpimitan määrittäminen

Peitteisen puun rungon mittaus sisätiloissa

Peitteinen kuusi mitattiin sisätiloissa sekä ZEB Horizonilla että VTT SPAD LiDAR:illa



Kuva 11). Molemmilla mittalaitteilla mittaus tehtiin yhdestä suunnasta oksaisimmalta puolelta puuta. Kuva 24 a) on ZEB Horizonilla mitattu raakapistepilvi ja Kuva 24 b) SPAD LiDAR:illa mitattu pistepilvi. SPAD LiDAR:in raakadatatista on erotettavissa puun runkoon ja jalustana käytettyyn saaviin kuuluvia sylinterimäisiä pistejoukkoja.



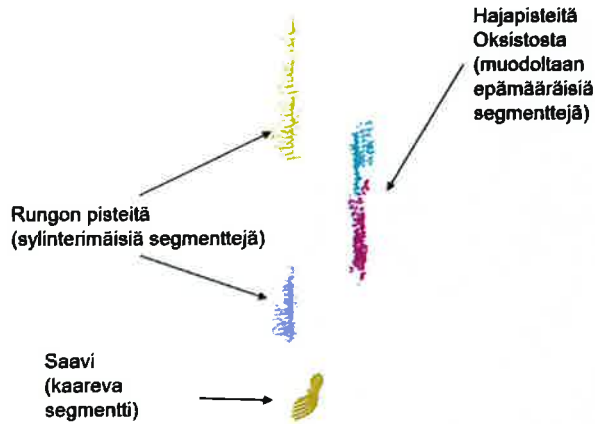
a)



b)

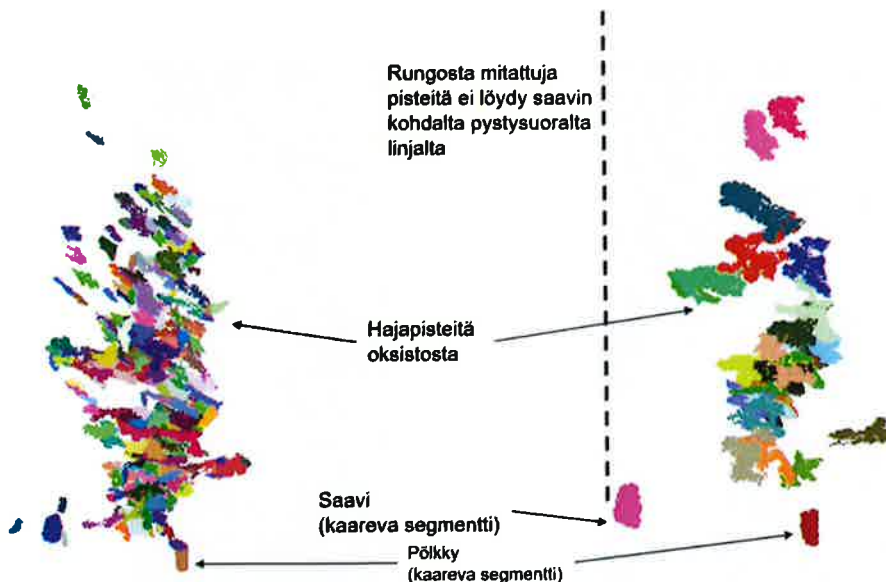
Kuva 24. Sisätiloissa peitteisestä kuusesta mitattu pistepilvi mittalaitteella a) ZEB Horizon ja b) VTT SPAD LiDAR. Mittaussuunta oli kuvaan nähden oikealta vasemmalle.

Kuva 25 on esimerkki tuloksesta, jossa SPAD LiDAR:illa mitattu pistedata on segmentoitu käyttäen Point Cloud Libraryn Region Growing algoritmia. Tuloksessa runkoon kuuluvat pisteet ovat eroteltuina sylinterimäisiin segmentteihin ja oksistosta mitatut hajanaiset pisteet muodoltaan epämääräisissä segmenteissä.



Kuva 25. Esimerkki SPAD LiDAR:in pistedatan segmentointituloksesta, jossa rungon pisteitä on eroteltu pistejoukoiksi.

Kuva 26 sisältää kaksi esimerkkiä ZEB Horizonilla peitteisestä koepuusta mitatun pistedatan tyypillisistä segmentointituloksista hieman eri parametreilla. Kummassakaan tapauksessa runkoon kuuluvia pistejoukkoja ei ollut erotettavissa mikä indikoi, että yhdestä suunnasta tehty skannaus ei tuottanut rungosta riittävän kattavasti pisteitä. Käytetty paikallisten pinnanormaalien kulmapoikkeamiin perustuva segmentointialgoritmi (PCL Region Growing) erottelisi rungon sylinterimäiset pistejoukot, kuten saavin ja etualalla olleen pölkyn pisteet, jos niitä olisi esiintynyt raakadatatassa.

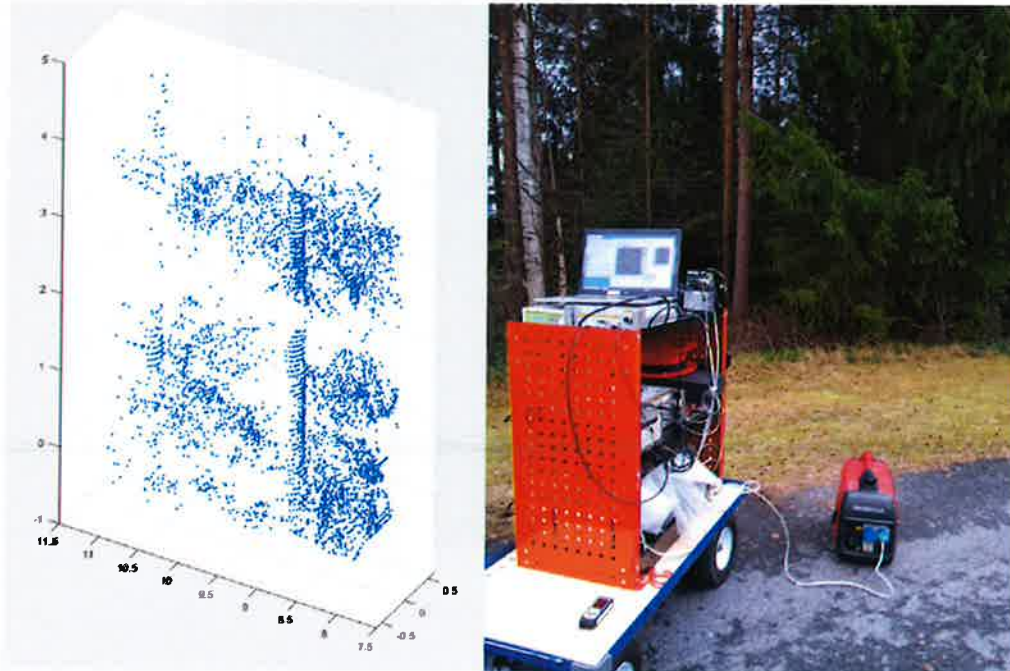


Kuva 26. Esimerkkejä peitteisestä kuudesta ZEB Horizonilla mitatun pistedatan segmentoinnista.

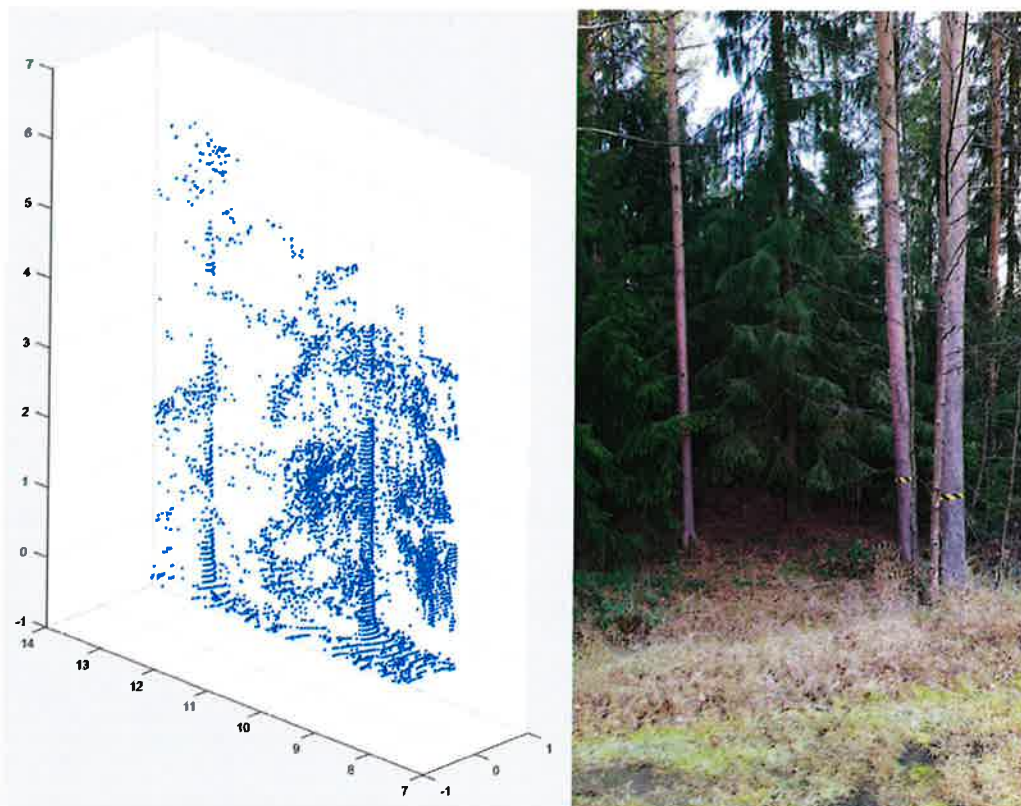
Ulkona mitattujen peitteisten koepuiden läpimittojen määrittäminen

Ulkona mitattiin 3 kpl peitteisiä kuusia VTT SPAD LiDAR:illa (Kuva 27, Kuva 28, Kuva 29) ja vastaavien kuusien 3D-pisteet leikattiin irti koko koemetsikön sisältävästä pistepilvestä (Kuva

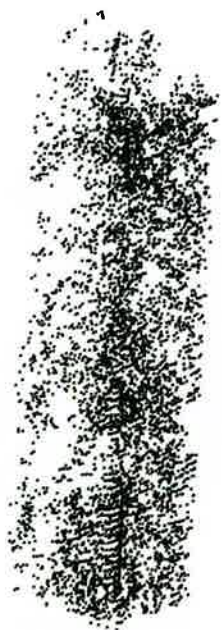
30). SPAD LiDAR:illa mitattiin kuuset vain yhdestä suunnasta toisin kuin ZEB Horizonilla kuusia oli mitattu eri suunnista koko koemetsikön kattavan skannauksen yhteydessä. ZEB Horizonilla puita oli mitattu lähes latvaan asti toisin kuin SPAD LiDAR:illa, jolla skannaus tehtiin maan tasasta noin 4,5 metrin korkeuteen, johtuen koelaitteiston mekaniikkarajoituksista.



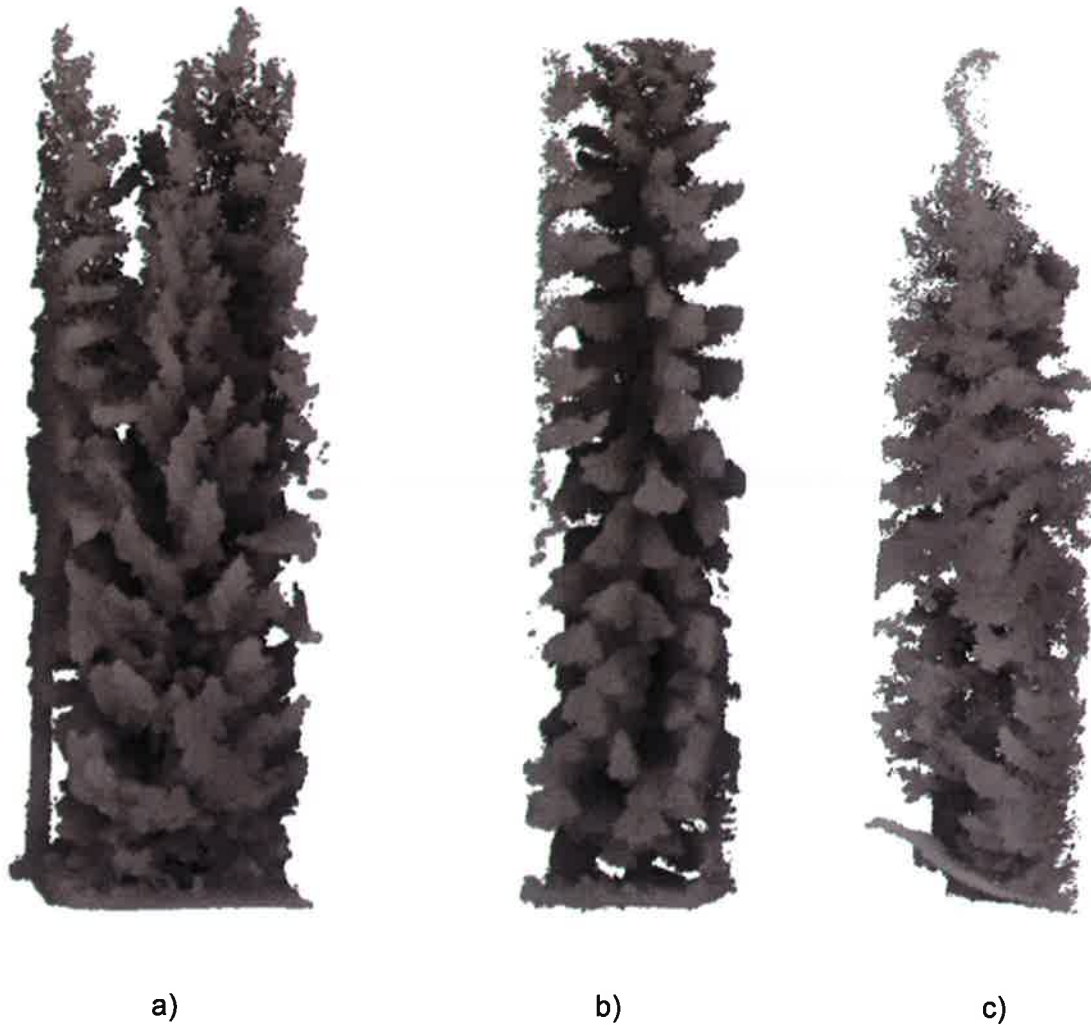
Kuva 27. Kuusi numero 1 ja VTT SPAD LiDAR:illa mitatut 3D-pisteet.



Kuva 28. Kuusi 2 ja VTT SPAD LiDAR:illa mitatut 3D-pisteet.



Kuva 29. Kuusi 3 ja VTT SPAD LiDAR:illa mitatut 3D-pisteet.



Kuva 30. Peitteisistä kuusista ZEB Horizonilla mitatut 3D-pisteet a) kuusi 1, b) kuusi 2 ja c) kuusi 3.

Rungon pisteiden segmentoitavuus peitteisistä puista

Kuvissa Kuva 31, Kuva 32 ja Kuva 33 on esitetty segmentointituloksia, kun tavoitteena oli erottaa koepuiden runkojen pisteet oksistosta ja muusta aluskasvillisuudesta mitatuista hajapisteistä. Segmentointimenetelmänä käytettiin Point Cloud Libraryn paikallisten pintanormaalien poikkeamiin perustuvaa Region Growing algoritmia. Koepuista mitatut raakadatat olivat siinä määrin erilaisia, ettei löydetty yleiskäyttöisiä segmentointiparametreja ja jokaiselle mittaustiedostolle täytyi käyttää hieman erilaisia parametriarvoja.

SPAD LiDAR:illa mitatuista pistepilvistä rungon pisteet saatiin eroteltua metsän pohjasta ja muusta aluskasvillisuudesta. ZEB Horizonilla mitatuista pistepilvistä rungon pisteet olivat myös erotettavissa kaikkien kolmen koepuun osalta, mutta rungon pisteitä sisältävään segmenttiin jäi tyypillisesti pisteitä joko oksistosta (Kuva 31 a) tai metsänpohjasta (Kuva 32 a). Segmentointitulokset osoittavat, että ZEB Horizonilla mitatusta datasta peitteisen rungon pisteiden segmentointi on haastavampaa kuin SPAD LiDAR:in datasta. Tulokset eivät kuitenkaan poissulje muita menetelmiä, jotka mahdollisesti soveltuisivat paremmin ZEB Horizonin datan segmentointiin.



a)



b)

Kuva 31. Kuusi 1 rungon pisteiden segmentointitulokset raakadatatista a) ZEB Horizon ja b) VTT SPAD LiDAR.

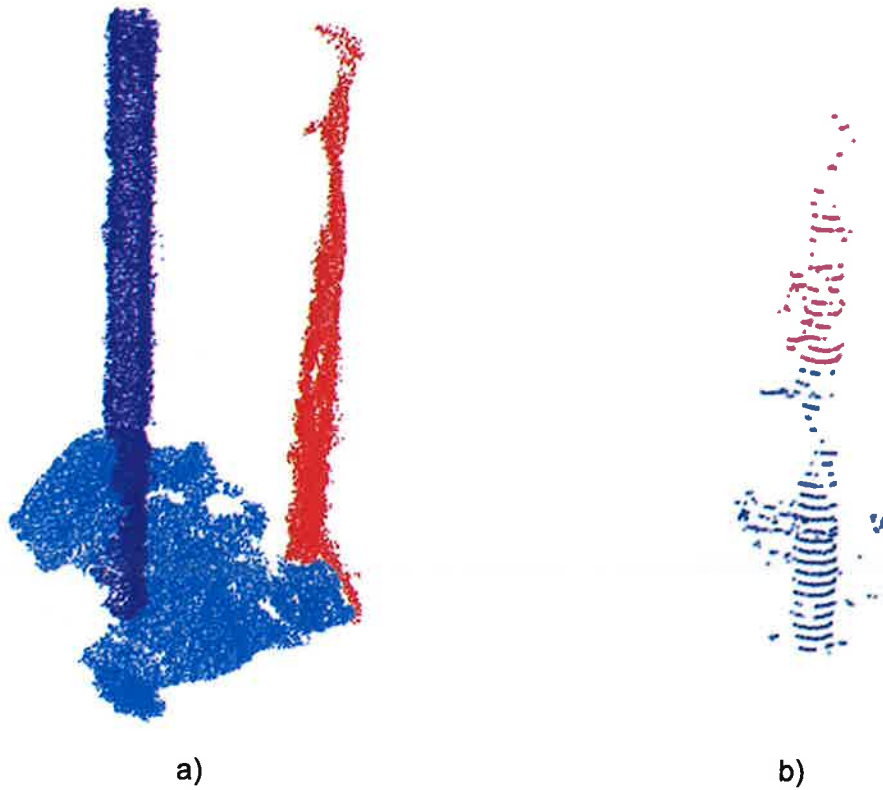


a)



b)

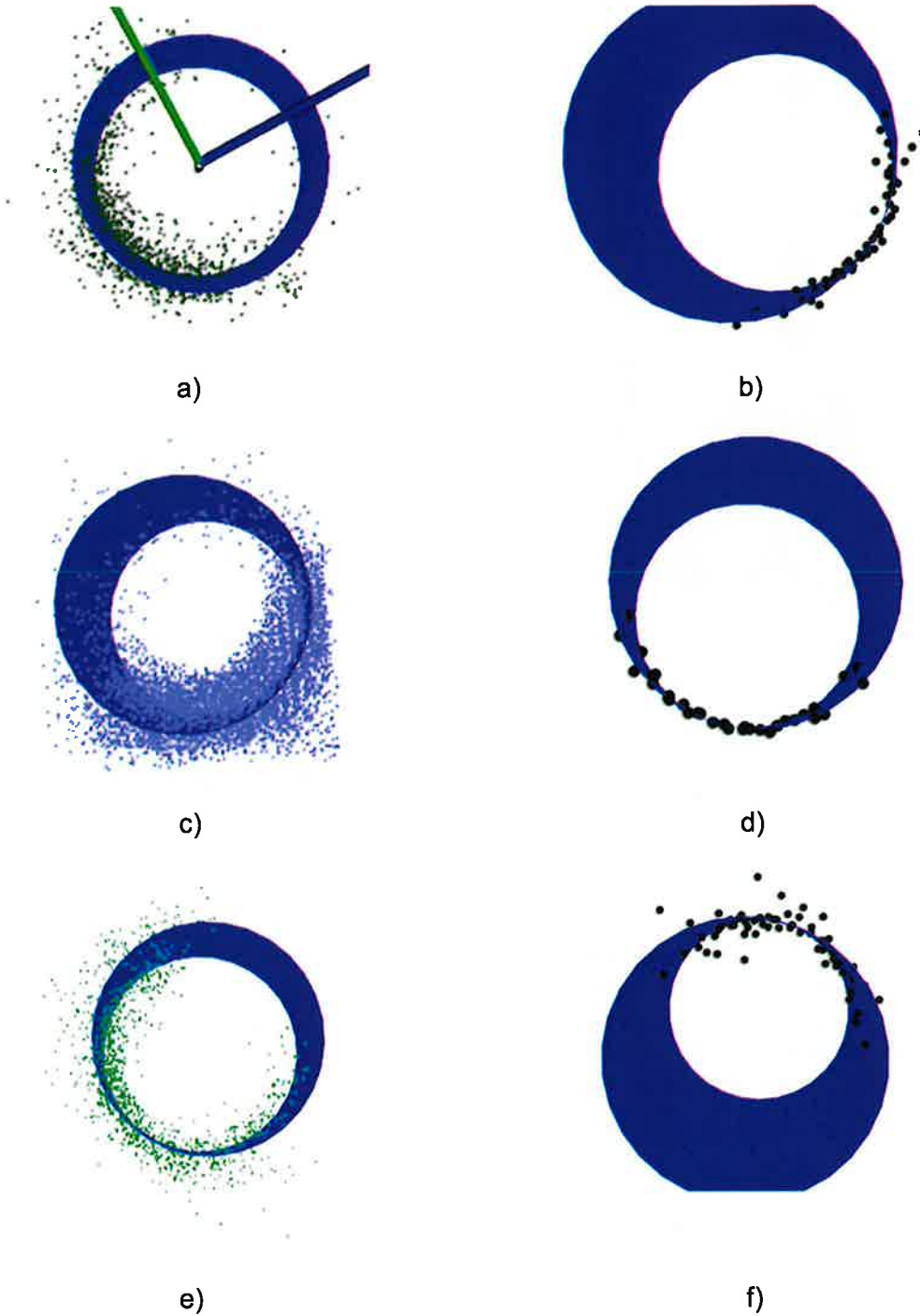
Kuva 32. Kuusi 2 rungon pisteiden segmentointitulokset a) ZEB Horizon ja b) VTT SPAD LiDAR.



Kuva 33. Kuusi 3 rungon pisteiden segmentointitulokset a) ZEB Horizon ja b) VTT SPAD LiDAR

Läpimitat

Läpimitat määritettiin ZEB Horizonilla ja SPAD LiDAR:illa peitteisistä koepuista mitatuista pistepilvistä sovittamalla sylinterimalli rinnankorkeudelta irti leikattuun joukkoon rungon pisteitä (Kuva 34). Tässä tapauksessa rungon pisteet segmentoitiin asettamalla manuaalisesti konenäköohjelmiston parametrit siten, että oksiston ja muun aluskasvillisuuden hajapisteet vaikuttaisivat sylinterisovitukseen mahdollisimman vähän.



Kuva 34. Sylinterimallin sovitus rungon pisteisiin rinnankorkeudelta (1,3m) kuusi 1 a) ZEB Horizon ja b) SPAD LiDAR; kuusi 2 c) ZEB Horizon ja d) SPAD LiDAR; kuusi 3 e) ZEB Horizon ja f) SPAD LiDAR.

Peitteisten koepuiden läpimittojen vertailuarvo mitattiin saksilla mahdollisimman läheltä 1,3 metrin korkeutta (Kuva 35). Kuusi 1 ja kuusi 3 tapauksessa mittauskohtaa oli siirrettävä oksien takia muutamia senttimetrejä ideaalisesta mittauskohdasta alas tai ylöspäin.



a)



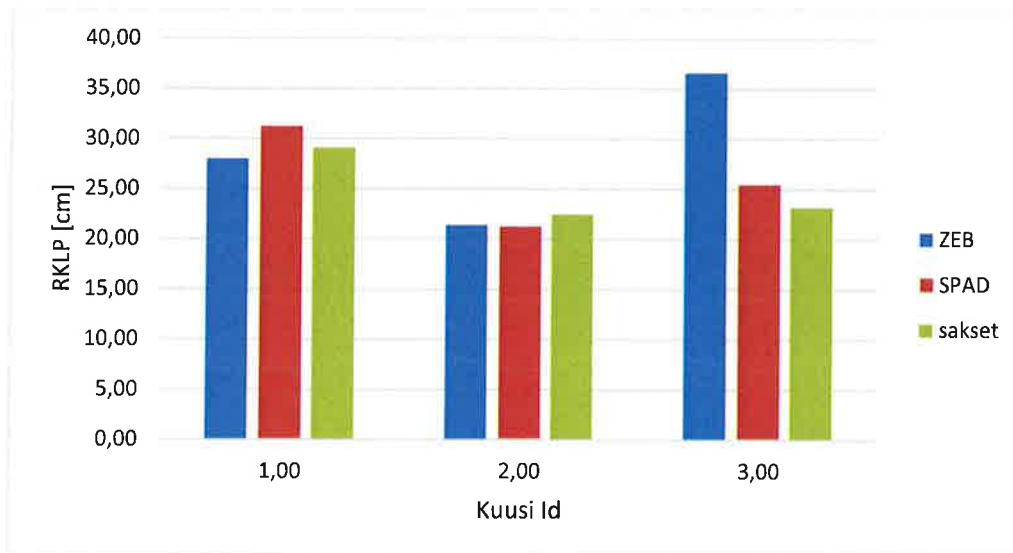
b)



c)

Kuva 35. Lämpimittojen mittaus saksilla peitteisistä koepuista a) kuusi 1, b) kuusi 2, c) kuusi 3.

Kuva 36. ovat peitteisten koepuiden läpimitat kolmella eri menetelmällä määritettynä. Lämpimittojen vaihteluvälit olivat 1 cm - 13 cm. Jos ei oteta huomioon kuusi nro 3:sta ZEB Horizonilla tehtyä mittausta, vaihteluvälit olivat 1 cm - 3 cm. Kuusi nro 3 kohdalla läpimitan määrittäminen ZEB Horizonin datasta on selvästi virheellinen, johtuen mahdollisesti läpimitan määrittämyskohdan runsaasta oksistosta.



Kuva 36. Peitteisten koepuiden läpimitat eri menetelmillä.

8. Johtopäätökset

Suomessa metsänarviointi on ollut korkealla tasolla jo vuosikymmenten ajan. Tämän vuosituhannen puolella on otettu suuri harppaus manuaalisista maastomenetelmistä kaukokartoitukseen hyödyntäen varsinkin lentolaserkeilausta (ALS). Kehitys jatkuu, mutta riittävän tarkka metsikkötason inventointi edellyttää edelleen useiden menetelmien ja teknologioiden soveltamista.

Metsikkötasolla päästään pääsääntöisesti jo nykyisillä menetelmillä Metsäkeskuksen asettamiin tavoitetarkkuuksiin puuston parametrien arvioinnissa. Haasteita tosin on vielä varsinkin taimikoiden arvioinnissa. Puustotunnusten tulkinta puukohtaisesti ei kuitenkaan vielä onnistu yleisen metsävaratiedon pohjalta. Tarkempaan metsänarviointiin on jo syntynyt liiketoimintaa, mistä on osoituksena tässäkin hankkeessa mukana ollut yritys (Silvere). Drone- ja maastokannauksen yhdistelmänä pystytään metsiköstä muodostamaan tarkka puukartta, jolloin ollaan jo lähempänä tavoitteena olevaa puukohtaista inventointia ja puunkorjuuta (täsmämetsätalous, precision forestry).

Tässä hankkeessa keskityttiin vertailemaan ja testaamaan eri menetelmien ja teknologioiden mittaustarkkuutta metsänarvioinnissa käytettävien keskeisten parametrien, etenkin rungon rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden suhteen. Keskeisessä roolissa olivat LiDAR (Light Detection And Ranging) tyyppiset skannerit, joita voidaan käyttää jalustalta, kannettavana maastossa tai ilmasta käsin joko dronesta tai lentokoneesta. Lisäksi koemittauksia tehtiin VTT:n koelaitteella, johon oli asennettu SPAD (Single Photon Avalanche Diode) detektori hyödyntäen yksifotonilaskentaa (single photon counting).

Leimikkotasoin mittaauksissa suurin mielenkiinto oli kaupallisen skannerin, 3D LiDAR ZEB Horizonin, ja VTT:n SPADin vertailussa. Molempien tarkkuus rungon läpimitan mittauksessa oli oletetulla tasolla eroten tyypillisesti 1-3 cm mittasaksimittauksista. Samoilla laitteilla mitattiin myös metsikön koepuiden lenkoutta, mutta silloin tarkkuudessa oli yllättävän suurta hajontaa, 1-6 cm manuaalimittauksista. Tämä viittaa siihen, että vinossa ollut vertikaali pinta rungon yläosassa olisi vääristänyt mittaustuloksia. Toki on otettava huomioon, että käsin tehdyt referenssimittaukset ovat herkkiä virheille. Haasteita asettaa lankamittauksella tehty lenkouden arviointi ja rungon soikeus. Tällöin rinnankorkeusläpimita on vastakkaisten mittausten keskiarvo, kun taas LiDAR mittaa juuri siltä puolen, mistä kaiku on saatu.

Tiedossa ei ole, että yksifotonilaskentaa perustuvaa laserskanneria olisi aikaisemmin käytetty puustotunnusten määrittämiseen maasto-olosuhteissa. Mittaukset osoittivat, että SPAD LiDAR:illa on erinomaiset mahdollisuudet tuottaa tarkempaa tietoa yksittäisistä puista verrattuna tavanomaiseen LiDAR:iin, varsinkin peitteisessä maastossa. Lisää tutkimusta ja uusia innovaatioita kuitenkin tarvitaan mittaussuorituksen lisäämiseksi. Tässä tutkimuksessa sovellettiin yhden ilmaisimen SPAD-LiDARia, mutta Ruokamon (2019) mukaan mittausta olisi mahdollista nopeuttaa käyttämällä yhden pikselin sijaan matriisi-ilmaisimia. Laite pitää myös kehittää kannettavaksi ja maastoon soveltuvaksi. Kaupallista potentiaalia on, mikäli laite voitaisiin tulevaisuudessa asentaa metsäkoneeseen keräämään dataa hakkuun yhteydessä tai sitä voitaisiin liikutella dronen avulla.

9. Yhteenveto

9.1 Tausta ja tavoite

Metsänarvioinnissa käytettävät puustotiedot on saatu perinteisesti maastossa mitattujen otantakoealojen avulla estimoimalla (Xie ym. 2020). Nykyisin maastomittausten tueksi on otettu myös laajojen alueiden laserkeilausta (Hyypä & Inkinen 1999, Holopainen ym. 2013).

Kummankin menetelmän puutteena on puustokartan ja tarkan puukohtaisen tiedon puuttuminen. Lisäksi maastotyö on kallista. Tarkat puukartat mahdollistavat hakkuun paremman suunnittelun ja puukohtaiset laatutietueet edelleen katkonnan optimoinnin ja hakkuusaantojen tarkemman arvioinnin. Lisäksi niiden avulla voidaan tehostaa metsänhoitoa ja saada kustannussäästöjä puunhankinnassa (Kangas ym. 2019).

Hankkeen keskeisimpiä tutkimustehtäviä oli etsiä ja arvioida edullisia laserkeilausvälineitä ja -menetelmiä sekä tunnistaa tekniikan kehitystrendejä, jotka mahdollistavat tarkemman, nopeamman ja taloudellisemman puu- ja puustotunnusten mittaamisen sekä niiden avulla tapahtuvan metsikön arvioinnin. Edelleen pyrkimyksenä oli tutkia uusia mittaustekniikoita, kuten yksifotonilaskentaan (single photon counting) perustuva laseretäisyysmittausta, jolla kyetään näkemään merkittävästi paremmin peitteiden taakse jääviä rungon osia ja erottamaan syvyysuunnassa lähekkäin olevia kohteita toisistaan. Lisäksi tavoitteena oli selvittää keveiden laserkeilainten soveltumista puunkorjuun apuvälineeksi. Pitkän ajan kehitystavoitteena nähdään, että puunkorjuuta ja rungon apteerausta voidaan automatisoida tarkemman laserkeilausdatan avulla.

9.2 Maastomittaus: toteutus ja tulokset

Maastomittauksia tehtiin kolmella keskisuomalaisella leimikolla, jotka hakattiin mittausten jälkeen. Kaikki koeleimikot pystymitattiin ja inventoitiin perustuen PreFor (Silvere) Oy:n laserkeilausmenetelmään sekä Trestima -matkapuhelinsovellukseen. Käytössä oli myös yleiseen metsävaratietoon perustuvat inventointitiedot. Lisäksi kahdella päätehakkuukuusikolla kokeiltiin Geotrim Oy:n maahantuomaa kannettavaa skanneria GeoSLAM ZEB Horizon 3D. Erikseen valitut koepuut kuvattiin peitteisessä maastossa myös kyseisellä laitteella. Mittausten pääasiallisiksi referenssiksi asetettiin hakkuukoneista saatu korjuudata sekä pystymittausaineisto. Koepuita verrattiin kuitenkin manuaalimittauksiin.

Koeleimikoiden vertailussa mukana on perinteisellä pystymittauksella (PM), hakkuukoneesta (Moto), Trestiman ja Silveren menetelmillä saadut puuston tilavuudet sekä julkiseen metsävaratietoon perustuva arvio (MK). On huomioitava, että leimikot hakattiin kasvukauden lopussa, kun taas mittaukset ja arvioinnit tehtiin sen puolivälissä.

Kaikilla mittaustavoilla leimikoiden runkoluvut olivat lähellä toisiaan. Suurimpia haasteita oli Trestimalla ja yleisellä metsävaratiedolla jaotella puulajit oikein harvennusleimikolla. Molemmilla koivun (+muut lehtipuut) osuus oli lähes kominkertainen todelliseen (PM) verrattuna.

Puuston pohjapinta-ala-arviot olivat kaikissa tapauksissa pystymitalla ja Silveren menetelmällä hyvin lähellä toisiaan, Silverellä yliarviota vain 4–6 %. Trestima yliarvioi puuston kaikissa tapauksissa. Metsävaratiedossa hajontaa oli enemmän (-8 - +15 %).

Kuten olettaa sopii, pystymitan ja moton tilavuusluvut ovat hyvin lähellä toisiaan pystymitan erotessa vain -1 - +0,5 % motomitasta. Silveren menetelmä yliarvioi harvennusleimikon puuston n. 7 %, mistä johtui myös vastaava poistuma(n) yliarvio (9 %). Päätehakkuissa ero oli pienempi vaihdellen -2 - +1 % pystymitasta. Metsävaratiedon mukainen tilavuusarvio kullekin leimikolle oli myös verraten lähellä pystymitan tuloksia vaihdellen niistä -3 - +7 %. On huomioitava, että päätehakkuiden poistumasta on vähennetty säästöpuut, jotka ovat metsävaratiedon 'poistumassa' (=päätehakkuun kokonaispuusto) mukana. Kaikkein suurimmat erot tulivat jälleen Trestima-mittauksilla. Yliarviota oli sekä Saarijärven harvennuksella (+62 %) että päätehakuulla (+10 %) ja aliarviota Keuruulla (-10 %). (Taulukko 4)

9.3 Puiden optinen mittaus: toteutus ja tulokset

Saarijärven koeleimikko skannattiin mittalaitteella ZEB Horizon ja leimikosta valittiin tarkempaan analyysiin 30 koepuuta, joiden sijainti georeferoidussa pistepilvessä määritettiin puiden GPS-koordinaattien perusteella (Kuva 13). Koepuut leikattiin koko leimikon kattavasta pistepilvestä erillisiin tiedostoihin ja puiden läpimitat ja pituudet määritettiin pistedatasta Kuva 12. mukaisilla ohjelmistoilla. Puiden läpimitat ja pituudet mitattiin maastossa mittasaksilla ja hypsometrillä ja arvoja verrattiin 3D-mittauksella saatuihin arvoihin.

Koepuiden 3D-mittauksesta määritettyjen läpimittojen keskivirhe maastomittaukseen verrattuna oli 0,81%, mutta yksittäisten koepuiden läpimitat saattoivat erota useita senttejä maastomittauksen arvosta. ZEB Horizonilla kerätty pistedata näyttäisi siis soveltuvan paremmin koko leimikon puumäärän arviointiin, mutta yksittäisten puiden läpimitoista ei välttämättä saada riittävän tarkkaa tietoa. (Taulukko 9)

Tuloksien perusteella 3D-pistedatasta määritetyt puiden pituudet ovat suhteellisesti tarkempia kuin läpimitat, kun tarkastellaan eroa maastomittauksessa määritettyihin arvoihin. Läpimitoissa 3D-mittauksen absoluuttinen ero maastomittaukseen mukailee ZEB Horizonille valmistajan ilmoittamaa mittaustarkkuutta 1 - 3 cm. Joidenkin koepuiden kohdalla absoluuttinen ero pituudessa oli huomattavasti suurempi, jopa yli 50 cm, mutta koska suurin osa puista oli yli 20 metriä pitkiä, suhteellinen ero maastomittaukseen oli melko pieni.

Koepuiden 3D-mittauksesta määritettyjen läpimittojen keskivirhe maastomittaukseen verrattuna oli 0,81%, mutta yksittäisten koepuiden läpimitat saattoivat erota useita senttejä maastomittauksen arvosta. ZEB Horizonilla kerätty pistedata näyttäisi siis soveltuvan paremmin koko leimikon puumäärän arviointiin, mutta yksittäisten puiden läpimitoista ei välttämättä saada riittävän tarkkaa tietoa.

Puiden optiset mittaustestit sisälsivät seuraavat koesarjat:

- 3D-mittalaitteiden vertailu säännöllisen sylinterin (pahvisylinteri) ja puun läpimitan (puupölkky) mittaamisessa
- Peitteisten koepuiden rungon näkyvyys ja rinnankorkeusläpimittojen määrittäminen
- Koepuiden rinnankorkeusläpimittojen ja lenkouksien mittaus

3D-mittalaitteiden vertailu tehtiin VTT:n koehallissa. Laatuparametrien mitattavuutta oksiston läpi selvitettiin mittaamalla peitteisiä kuusia VTT:n SPAD-LiDAR:illa ja ZEB Horizonilla sekä sisätiloissa että ulkona koemetsikössä. Kaikissa kokeissa vertailumuuttujana oli puun läpimita sekä lenkouden mittauksessa luonnollisesti maksimilenkous. Sisätiloissa tehdyn mittalaittevertailun tavoitteena oli todentaa nykyisten kuluttajaluokan ja teollisten 3D-kameroiden tarkkuutta ja soveltuvuutta puun läpimitan mittaamiseen. Mittalaitteet tuottivat vertailudataa kontrolloidussa ympäristössä eri kuvanmuodostusteknologioilla mukaan lukien aktiivinen stereokamera (Intel RealSense), passiivinen stereokamera (StereoLabs ZED), valon kulkuaikaa mittaava syvyyskamera eli Time-of-Flight (ToF) kamera (IFM 03X100), kartoittava laserkeilain (ZEB Horizon) sekä tilastolliseen yksifotonilaskentaan perustuva mittalaitte (VTT SPAD-LiDAR). Vertailuarvo 3D-mittauksilla saaduille läpimitoille määritettiin mittasaksilla puolivälistä pölkkyä (Kuva 19). Saksilla määritetty läpimita oli pölkyn minimi- ja maksimiläpimitan keskiarvo.

Säännöllisen pahvisylinterin läpimitan määrittämisessä tarkimmat tulokset saatiin mittalaitteilla Intel RealSense (läpimitan virhe < 0.5 mm) ja VTT SPAD LiDAR (läpimitan virhe \approx +1 mm). Muilla mittalaitteilla pahvisylinterille saatiin 7 - 8 mm pienempi läpimita kuin työntömitalla määritetty läpimita. Puupölkyn läpimitan määrittämisessä eri mittalaitteilla saatujen läpimittojen vaihteluväli oli 3,5 cm, kun pölkyn mittasaksilla määritetty läpimita oli 20,4 cm. Lähimpänä mittasaksilla määritettyä läpimittaa oli Intel RealSensella määritetty läpimita 20,6 cm. Toiseksi lähimpänä saksilla mitattua arvoa olivat StereoLabs ZED ja VTT SPAD LiDAR, joilla

molemmilla läpimitaksi saatiin 21,1 cm. ZEB Horizonilla määritetty läpimitta oli 19,2 cm eli 1,2 cm pienempi kuin saksilla määritetty läpimitta.

VTT SPAD LiDAR:illa oli mahdollista mitata kuusen rungon pisteitä peitteisimmältä puolelta oksiston läpi. Vastaavasta suunnasta ZEB Horizonilla mitatusta pistedatasta ei pystytty erottamaan tai segmentoimaan kuusen rungon pisteitä. Ulkona mitatuista peitteisistä kuusista onnistuttiin erottamaan ja segmentoimaan rungon pisteitä sekä ZEB Horizonilla että SPAD LiDAR:illa mitatusta pistedatasta. ZEB Horizonin osalta peitteisten runkojen parempi mitattavuus ulkona johtui todennäköisesti siitä, että puut oli skannattu useista eri suunnista, mikä auttoi hyödyntämään ZEB Horizonin SLAM-ominaisuuksia. Sen sijaan SPAD LiDAR:illa puut oli mahdollista skannata vain yhdestä suunnasta. Oksaisimman koepuun tapauksessa havaittiin, että ZEB Horizonin mittaustarkkuus kärsi runsaasta oksistosta rinnankorkeudella, kun taas VTT SPAD LiDAR:in tarkkuuteen oksistolla oli vähäisempi vaikutus.

Peitteettömien mäntyjen rinnankorkeusläpimittojen vaihteluväli oli tyypillisesti 2 - 3 cm, kun puut mitattiin ZEB Horizonilla (ympäri skannaus), VTT SPAD LiDAR:illa (skannaus yhdestä suunnasta) ja mittasaksilla (min-max läpimitan keskiarvo). Pystypuiden tyvestä 4 metrin korkeuteen määritetyn lenkouden vaihteluväli oli 2 - 6 cm ja useiden senttimetrien poikkeamia lenkouksissa esiintyi sekä SPAD LiDARilla ja ZEB Horizonilla mitattujen arvojen kuin manuaalisen lankamittaukset ja 3D-mittauksien välillä.

9.4 Johtopäätökset

Suomessa metsänarviointi on ollut korkealla tasolla jo vuosikymmenten ajan. Tämän vuosituhannen puolella on otettu suuri harppaus manuaalisista maastomenetelmistä kaukokartoitukseen hyödyntäen varsinkin lentolaserkeilausta (ALS). Kehitys jatkuu, mutta riittävän tarkka metsikkötason inventointi edellyttää edelleen useiden menetelmien ja teknologioiden soveltamista. Puustotunnusten tulkinta puukohtaisesti ei vielä onnistu yleisen metsävaratiedon pohjalta. Tällaisesta tiedosta olisi kuitenkin selkeätä hyötyä niin metsänomistajalle kuin puun ostajalle, sekä metsänhoidossa että puunkorjuussa. (Kangas ym. 2019)

Leimikkotason mittauksissa suurin mielenkiinto oli kaupallisen skannerin, 3D LiDAR ZEB Horizonin, ja VTT:n SPADin vertailussa. LiDAR-(Light Detection And Ranging) tyyppisiä skannereita voidaan käyttää jalustalta, kannettavana maastossa tai ilmasta käsin joko dronesta tai lentokoneesta. VTT:n koelaitteeseen oli asennettu SPAD (Single Photon Avalanche Diode) detektori hyödyntäen yksifotonilaskentaa (single photon counting).

Molempien tarkkuus rungon läpimitan mittauksessa oli oletetulla tasolla eroten tyypillisesti 1-3 cm mittasaksimittauksista. Samoilla laitteilla mitattiin myös metsikön koepuiden lenkoutta, mutta silloin tarkkuudessa oli yllättävän suurta hajontaa, 1-6 cm manuaalimittauksista. Tämä viittaa siihen, että vinossa ollut vertikaali pinta rungon yläosassa olisi vääristänyt mittaustuloksia. Toki on otettava huomioon, että käsin tehdyt referenssimittaukset ovat herkkiä virheille.

Tiedossa ei ole, että yksifotonilaskentaa perustuvaa laserskanneria olisi aikaisemmin käytetty puustotunnusten määrittämiseen maasto-olosuhteissa. Mittaukset osoittivat, että SPAD LiDAR:illa on erinomaiset mahdollisuudet tuottaa tarkempaa tietoa yksittäisistä puista verrattuna tavanomaiseen LiDAR:iin, varsinkin peitteisessä maastossa. Lisää tutkimusta ja uusia innovaatioita kuitenkin tarvitaan mittausnopeuden lisäämiseksi. Tässä tutkimuksessa sovellettiin yhden ilmaisimen SPAD-LiDAR:ia, mutta Ruokamon (2019) mukaan mittausta olisi mahdollista nopeuttaa käyttämällä yhden pikselin sijaan matriisi-ilmaisimia. Laite pitää myös kehittää kannettavaksi ja maastoon soveltuvaksi. Kaupallista potentiaalia on, mikäli se voitaisiin tulevaisuudessa asentaa metsäkoneeseen keräämään dataa hakkuun yhteydessä tai sitä voitaisiin liikutella dronen avulla.

Lähdeviitteet

- Bitterlich, W. 1984. The Relascope Idea. Relative Measurements in Forestry. Commonwealth Agricultural Bureaux, London, UK. p. 242.
- Chan, Halimi, Zhu, Gyongy, Henderson, Bowman, Laughlin, Buller & Leach. 2019. Long-range depth imaging using a single-photon detector array and non-local data fusion. *Sci Rep* 9, 8075. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44316-x>
- Falkowski, M., Smith, A., Gessler, P.E., Hudak, A.T., Vierling, L. A. & Evans, J.S. 2008. The influence of conifer forest canopy cover on the accuracy of two individual tree measurement algorithms using LiDAR data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34 (S2), pp. 338-350
- Ghimire, S., Xystrakis, F. & Koutsias, N. 2017. Using Terrestrial Laser Scanning to Measure Forest Inventory Parameters in a Mediterranean Coniferous Stand of Western Greece. *PFG* 85, 213–225 (2017). <https://doi.org/10.1007/s41064-017-0024-1>
- Haara, A. & Korhonen, K. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Hecht, R., Meinel, G. & Buchroithner, M.F. 2008. Estimation of urban green volume based on single-pulse LiDAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (11) (2008), pp. 3832-3840
- Heikkilä, J. 2020. Metsävaratieto - nykytila ja tuleva. *DigiInventory tulosseminaari*. Jämsä. 4.9.2020.
- Heikkilä, J. 2018. Sähköposti 26.6.2018
- Heikkilä, J. 2017. Metsävaratiedon laatu ja kehittäminen. *Webinaari* 21.4.2018. <https://www.slideshare.net/Metsakeskus/metsakeskuksen-tuottaman-metsavaratiedon-laatu-metstiedon-johtava-asiantuntija-juho-heikkil-suomen-metsakeskus>
- Henriksson, Larsson, Grönwall & Tolt. 2016. Continuously scanning time-correlated single-photon-counting single-pixel 3-D lidar. *Opt. Eng.* 56(3), 031204. 2016. doi: 10.1117/1.OE.56.3.031204.
- Henttonen, H., Mäkinen, H. & Nöjd, P. 2009. Seasonal dynamics of wood formation of Scots pine and Norway spruce in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 39: 606–618.
- Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 7: 1–152.
- Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. *Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja* 5: 1–75.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Kalliovirta, J., Mäkinen, A., Haapanen, R., Melkas, T., Yu, X. & Hyypä, J. 2010b. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research* 129: 1131–1142
- Holopainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., ... Alho, P. 2013. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning - A case study in a

heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(4), 546-553. DOI: 10.1016/j.ufug.2013.06.002

Holopainen, M., Hyypä, J., Vastaranta, M. ja Hyypä, H. 2011. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos, Geodeettinen laitos, Aalto-yliopisto. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol. 22, No. 3, 2011

Huang, Y., Yu, B., Zhou, J., Hu, C., Tan, W., Hu, Z., Wu, J. 2013. Toward automatic estimation of urban green volume using airborne LiDAR data and high resolution remote sensing images. *Frontiers of Earth Science*, 7 (1) (2013), pp. 43-54

Hyypä, J., Yu, X., Hyypä, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Vaaja, M., Koskinen, J. & Alho, P. 2012. Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing* 2012(4): 1190–1207; doi:10.3390/rs4051190.

Hyypä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M. & Inkinen M. 2001a. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(5): 969–975.

Hyypä H. & Hyypä, J. 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16(2): 5–15.

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

Häggman, B. 1997. Metsän mittaus ja arviointi. Teoksessa *Tapion taskukirja*. 23. uudistettu painos. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Helsinki. ss.370-403.

Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Yu, X., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Lin, Y. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (6) (2010), pp. 514-522

Jahromi & Kostamovaara. 2018. Timing and probability of crosstalk in a dense CMOS SPAD array in pulsed TOF applications. *Optics Express* Vol. 26, No. 16, 6 Aug 2018.

Kaartinen, H.; Hyypä, J.; Vastaranta, M.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; Yu, X.; Pyörälä, J.; Liang, X.; Liu, J.; Wang, Y.; Kaijaluoto, R.; Melkas, T.; Holopainen, M.; Hyypä, H. Accuracy of Kinematic Positioning Using Global Satellite Navigation Systems under Forest Canopies. *Forests* 2015, 6, 3218-3236

Kaartinen, H., Hyypä, J. 2008. EuroSDR/ISPRS Project Commission II, Tree Extraction, Final Report. EuroSDR (European Spatial Data Research) (Official Publication No 53)

Kangas, A., Haara, A., Holopainen, M., Luoma, V., Packalen, P., Packalen, T., Ruotsalainen, R. & Saarinen, N. 2019. Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyötyanalyysi: MetKu-hankkeen loppuraportti. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 6/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 32 s.

Kangas, A. ja Packalen, T. 2018. Metsävaratieto metsäalan toimijoiden päätöksenteossa – käyttötapaukset ja hyötyyn vaikuttavat tekijät. *Metsätieteen Aikakauskirja* 4/2018.

Kankare, V., Vauhkonen, J., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., Vastaranta, M., Viitala, R. 2014. Accuracy in estimation of timber assortments and stem distribution - A comparison of airborne and terrestrial laser scanning techniques. [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.008). 89-97. [10.1016/j.isprsjprs.2014.08.008](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.008)

Kankare, V., Niemi, M., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2015. Puustobiomassan kartoituksen ja seurannan kehittäminen. Metsätieteen aikakauskirja 1/2015. 23-29.

Korpela, I., Ørka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyypä, J., 2010. Tree species classification using airborne LiDAR – effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization and sensor type. *Silva Fennica* 44: 319–339.

Laasasenaho, J. 2018. Esitys pääkaupunkiseudun metsänomistajille 4.12.2018.

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

Laser2020. <http://kmtk.paikkatietoalusta.fi/projektit-ja-tyopakettit/laser2020>

Lehtomäki, M., Jaakkola, A., Hyypä, J., Kukko, A., Kaartinen, H. 2010. Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data. *Remote Sensing*, 2, pp. 641-664

Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2012. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(2): 661–670.

Luonnonvarakeskus. 2020. Kantorahatulot vuona 2019. https://stat.luke.fi/kantorahatulot-2019_fi

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*, 29 (2008), pp. 1579-1593

Maltamo, M., Peuhkurinen, J., Malinen, J., Vauhkonen, J., Packalén, P. & Tokola, T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica* 43(3):507–521.

Maltamo, M., Mustonen, K., Hyypä, J., Pitkänen, J., & Yu, X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791–1801.

Metsäkeskus. 2018a. <https://www.metsakeskus.fi/metsatiedon-keruu>

Metsäkeskus. 2018b.

<https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=b973d201c5b847acba0c4f11dc29a29c>

Metsäkeskus. 2020. Yksityismetsien metsävaratieto.

<https://www.metsakeskus.fi/yksityismetsien-metsavaratieto>

Metsäteho. 1989. Sahapuurunkojen apteeraus. Sahatukien laatuvaatimukset.

Mäkinen, H., Nöjd, P., Jyske, T., Mielikäinen, K., Kalliokoski, T., Repo, T. & Ilari Lumme, I. 2002. Kuusen kasvu muuttuvassa ilmastossa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2012. s. 307-311.

Næsset, E., 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49–56.

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

Omasa, K., Hosoi, F., Uenishi, T.M., Shimizu, Y., Akiyama, Y. 2008. Three-dimensional modeling of an urban park and trees by combined airborne and portable on-ground scanning LiDAR remote sensing. *Environmental Modeling and Assessment*, 13 (4) (2008), pp. 473-481

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

Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J., Pitkänen, J. & Packalén, P., 2007. Preharvest measurement of marked stands using airborne laser scanning. *Forest Science* 53(6): 653–661.

PMP-ohje.1982. PMP-systeemin hoitokunta.

Ruokamo, H. 2019. Time-gating technique for a single-photon detection-based solid-state time-of-flight 3D range imager. Doctoral Thesis. University of Oulu. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526224756>

Rutzinger, M., Pratihast, A.K., Oude Elberink, S. & Vosselman, G. 2010. Detection and modelling of 3D trees from mobile laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII (Part 5), pp. 520-52 (Newcastle upon Tyne, UK)

Siipilehto J., Lindeman H., Vastaranta M., Yu X. & Uusitalo J. 2016. Reliability of the predicted stand structure for clearcut stands using optional methods: airborne laser scanning-based methods, smartphone-based forest inventory application Trestima and pre-harvest measurement tool EMO. *Silva Fennica* vol. 50 no. 3 article id 1568. 24 p. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1568>.

Swatantran, Tang, Barrett, DeCola & Dubayah. 2016. Rapid, High-Resolution Forest Structure and Terrain Mapping over Large Areas using Single Photon Lidar. *Sci Rep* 6, 28277 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep28277>

Tomppo, E., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Ihalainen, A., Katila, M., Mäkelä, H. et al. 2011. Designing and Conducting a Forest Inventory - case: 9th National Forest Inventory of Finland. *Managing Forest Ecosystem*. Springer Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-1652-0>

Trestima. 2019. Trestima maastotallennin. Käyttöohje v.1.2.

Vauhkonen, J. 2010. Estimating single-tree attributes by airborne laser scanning: methods based on computational geometry of the 3-D point data. *Dissertationes Forestales* 104. 44 p. Doctoral thesis.

Vastaranta, M. Holopainen, M., Yu X., Hyypä J., Mäkinen A., Rasinmäki J., Melkas T., Kaartinen H., Hyypä H. 2008. Effects of individual tree detection error sources on forest management planning calculations. *Remote Sensing*, pp. 1614-1626, 10:3390/rs3081614

Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., ... Hyypä, H. 2011. Effects of Individual Tree Detection Error Sources on Forest Management Planning Calculations. *Remote Sensing*, 3(8), 1614–1626. doi:10.3390/rs3081614

Wästlund , Holmgren, Lindberg & Olsson. 2018. Using a High Altitude Single Photon Lidar System" *Remote Sens.* 10, no. 9: 1422. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10091422>

Xie, Y., Zhang, J., Chen, X. et al. 2020. Accuracy assessment and error analysis for diameter at breast height measurement of trees obtained using a novel backpack LiDAR system. *For. Ecosyst.* 7, 33 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00237-0>

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

Zhang, C. & Qiu, F. 2012. Mapping individual tree species in a urban forest using airborne LiDAR data and hyperspectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78 (10), pp. 1079-1087

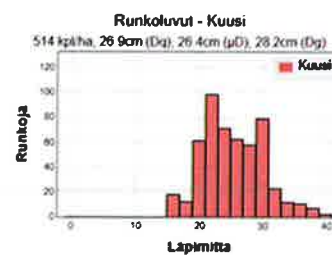
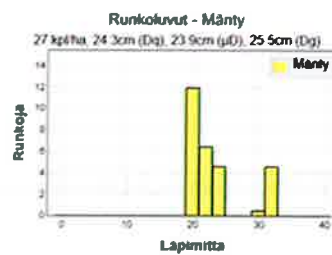
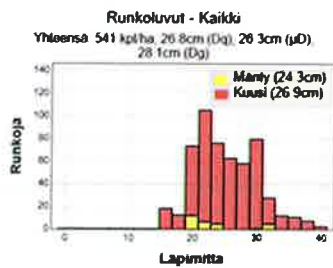
Liite 1: Trestiman tulostaulukot

Taulukko 1. Keuruun päätehakkuuleimikko.

Puustotiedot

Laji	Ppa (m ² /ha)	Runkoja (kpl/ha)	Pituus (m)	Läpimitta (cm)	Ikä (v)	Tukki-%	Tilavuus (m ³ /ha)	Tilavuus (m ³)
Kuusi	29,1	514	23,5	28,2	83	70	318,6	329,2
Mänty	1,3	28	20,5	25,5	57	58	12,1	12,5
Yhteensä	30,4	542	23,4	28,0	82	70	330,8	341,7

Keskiarvo 6,0%



Taulukko 2. Saarijärven päätehakkuuleimikko.

Puustotiedot

Laji	Ppa (m ² /ha)	Runkoja (kpl/ha)	Pituus (m)	Läpimitta (cm)	Ikä (v)	Tukki-%	Tilavuus (m ³ /ha)	Tilavuus (m ³)
Kuusi	24,1	573	21,7	27,1	87	55	233,0	346,3
Mänty	5,5	128	20,1	24,5	70	58	51,5	78,6
Korvu	1,5	47	18,8	20,6	62	16	10,8	16,1
Muu	0,6	-	-	-	-	-	-	-
Yhteensä	31,8	748	21,1	26,1	82	53	295,3	438,9

Keskiarvo 12,7%

Taulukko 3. Saarijärven harvennusleimikko.

Puustotiedot

Laji	Ppa (m ² /ha)	Runkoja (kpl/ha)	Pituus (m)	Läpimitta (cm)	Ikä (v)	Tukki-%	Tilavuus (m ³ /ha)	Tilavuus (m ³)
Mänty	28,7	1011	17,3	20,3	54	41	218,5	378,0
Korvu	2,9	285	12,6	12,2	36	1	14,0	24,1
Kuusi	0,6	34	13,4	14,8	40	-	3,9	6,8
Haapa	0,4	-	-	-	-	-	-	-
Muu	0,2	-	-	-	-	-	-	-
Yhteensä	30,7	1330	16,1	18,3	60	32	236,4	408,9

Keskiarvo 8,0%

