



Eteläboreaalisen puuston maan ylä- puolisen biomassan mallintaminen maa- ja ilmalaserkeilauksen avulla

Niko Ryöppy

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021

Metsätalouden tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Metsätalouden tutkinto-ohjelma

RYÖPPY, NIKO:

Eteläboreaalisen puuston maan yläpuolisen biomassan mallintaminen maa- ja ilmalaserkeilauksen avulla

Opinnäytetyö 88 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Toukokuu 2021

Opinnäytetyö on kvantitatiivinen tutkimus, joka on tehty puolustusvoimien tutkimuslaitoksen asetekniikkaosaston toimeksiantona, ja sen päätavoitteena on selvittää puuston biomassan määrän mallinnustarkkuus eri katselukulmista toteutettavilla laserkeilausmenetelmillä. Puolustusvoimille on laadittu julkisuuslain (621/1999) perusteella salassa pidettävä liiteosio, joka pitää sisällään maanpuolustuksen kannalta (JulKL 24§ 10k) tarkkoja sijaintitietoja.

Työn teoreettinen tarkastelu rajautuu kaukokartoituksen ja paikkatiedon perusteisiin, laserkeilaustekniikoihin, puustotunnuksiin ja biomassamalleihin. Maastomittauksella itse tuotettua laserkeilausaineistoa verrattiin Maanmittauslaitoksen tuottamaan ilmalaserkeilausaineistoon. Kohdemetsikkö valikoitui puolustusvoimien tutkimuslaitoksen määrittämältä alueelta, josta otosten alkiot valittiin eri laserkeilausaineistoista systemaattisesti vastaamaan toisiaan. Aineistoille toteutettiin eri asteisia tilastollisesti kuvaavia analyysejä. Työn tulokset pohjautuvat useampaan puustotunnuksiin mallintavaan kaavaan. Lähes kaikki biomassamallien lähtöarvot, eli mitatut tai mallinnetut puustotunnukset, olivat subjektiivisia.

Tuloksista käy ilmi, että TLS-menetelmällä tuotetusta pistepilvestä voidaan suoraan mitata yksittäisen puun perustunnuksia, kuten pituus ja rinnankorkeusläpimitta, suurella tarkkuudella. ALS-menetelmällä tuotetusta pistepilvestä vain pituus oli suoraan mitattavissa. Aluepohjaisesti puustotunnukset osuivat hyvin lähelle toisiaan. TLS-puustotunnuksista biomassa ja keskiläpimitta olivat 1.01 % (689 kg) ja 1.46 % (0.65 cm) pienempiä, kuin ALS-puustotunnukset. TLS-aineiston pohjalta mitattu keskipituus oli ALS-keskipituutta jonkin verran pidempi, 1.71 % (0.4 m). Tulosten pohjalta on tehtävissä loogisia johtopäätöksiä eri laserkeilausmenetelmien tarkkuuksista. Molemmat menetelmät päihittävät perinteiset metsänmittausmenetelmät biomassan aluepohjaisessa määrittämisessä.

Suositteluvia jatkotutkimusaiheita ovat konenäköön ja kuvatulkintaa liittyvien algoritmien kehittäminen, jotta pistepilvestä tai ilmakuvilta olisi automaattisesti, objektiivisesti ja riittävällä tarkkuudella johdettavissa puustotunnuksia.

Asiasanat: kaukokartoitus, laserkeilaus, terrestriaalinen laserkeilaus, biomassa

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme of Forestry

RYÖPPY, NIKO:

Modelling The Above Ground Biomass of Southboreal Trees by Means of Terrestrial and Airborne Laser Scanning

Bachelor's thesis 88 pages, appendices 7 pages
May 2021

The thesis is a quantitative study undertaken as a commission by the Weapons Engineering Division of the Finnish Defence Force Research Institute, and its main objective is to determine the modeling accuracy of the amount of biomass of trees using laser scanning methods from different viewing angles. On the basis of the Publicity Act (621/1999), a confidential annex section was compiled for the Finnish Defence Forces, which contains accurate location data regarding national defence (AOGA 24§ 10k).

Theoretical examination of the work was based on the fundamentals of remote sensing and spatial information, laser scanning techniques, tree attributes and biomass models. The self-produced field survey data was compared to the airborne laser scanning data, produced by the National Land Survey of Finland (NLS). The study area was determined by the Finnish Defence Forces Research Institute, from which the samples were selected from different laser scanning data, to systematically match each other. Statistically descriptive analyses of different degrees were carried out for the two datasets. The results of the work are based on a number of formulas that model the tree attributes. Almost all of the starting values of biomass models, i.e., directly measured or modeled tree attributes, were subjective.

The results show that from a TLS-point cloud, one can directly measure the basic attributes of an individual tree, such as length and DBH, with high accuracy. From the ALS-point cloud, only tree height was directly measurable. On the Area Based Approach, the tree attributes, measured from different methods, come very close to each other. However, based on the results of the work, logical conclusions about the accuracy of different laser scanning methods, can be drawn. Both methods beat traditional field measurements in area-based determination of stand-level biomass.

Recommended further research topics include the further development of algorithms related to computer vision and photointerpretation, to provide automatically objectively and with sufficient accuracy derived tree attributes, such as breast height diameter or crown diameter, from point clouds or aerial imagery.

Key words: remote sensing, laser scanning, terrestrial laser scanning, biomass

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	KAUKOKARTOITUS JA PAIKKATIETO	9
	2.1 Kaukokartoitus käsitteenä	9
	2.2 Kaukokartoituksen edut ja rajoitukset.....	10
	2.3 Paikkatieto	11
3	LASERKEILAUS	13
	3.1 Laserkeilauksen periaate	13
	3.2 Ilmalaserkeilaus	14
	3.3 Ilmalaserkeilauksen ominaisuuksista	15
4	MML:N ILMALASERKEILAUSAINIESTOT	16
	4.1 Vanhan inventointikierron laserkeilausaineisto	16
	4.2 Uuden laserkeilausohjelman laserkeilausaineisto	16
5	MAANPÄÄLLINEN LASERKEILAUS	18
	5.1 Maalaserkeilaimen mittausperiaate.....	18
	5.2 Sääolosuhteiden vaikutus	23
	5.3 ALS- ja TLS-menetelmien vertailu.....	23
6	PISTEPILVET METSÄNMITTAUKSESSA.....	26
	6.1 Aluepohjainen puustotulkinta	26
	6.2 Yksittäisten puiden mittaus ja tulkinta pistepilvestä.....	27
	6.3 Pituuden arviointi pistepilvestä.....	28
	6.4 Rinnankorkeusläpimitan määrittäminen pistepilvestä.....	28
	6.5 Latvuston korkeusmalli.....	29
	6.6 Visuaalinen kuvatulkinta.....	29
7	PUUSTOTUNNUKSET, BIOMASSA JA BIOMASSAMALLIT	31
	7.1 Puustotunnukset ja niiden tulkinta.....	31
	7.1.1 Rinnankorkeusläpimitta ($d_{1.3}$).....	33
	7.1.2 Puun pituus (h)	35
	7.1.3 Puuston pohjapinta-ala (ppa) & relaskooppikoeala	36
	7.2 Kasvillisuuden biomassa	36
	7.2.1 Biomassa (B) puustotunnuksena.....	37
	7.2.2 Metsäbiomassan määrittäminen ALS-aineistosta.....	38
	7.3 Biomassan määrittäminen.....	39
8	AINIESTO JA TUTKIMUSMENETELMÄ	43
	8.1 Tutkimusaineiston hankinta.....	43
	8.2 Kenttätöiden suunnittelu ja valmistavat toimenpiteet.....	44
	8.3 Mittalaitteet ja -välineet	45

8.4	Maalaserkeilaimen tarkkuusasetukset	46
8.5	Mittausajankohdan sääolosuhteet.....	47
8.6	Inventoitava alue	48
8.6.1	Kojeasemat	49
8.6.2	Referenssikoealat.....	51
8.7	Tutkimusmenetelmä.....	52
8.8	Ohjelmistot.....	53
8.9	Korkeusmallin luominen	54
8.10	Puun pituuden (h) määrittäminen	57
8.11	Puun rinnankorkeusläpimitan määrittäminen TLS-aineistosta ...	58
8.12	Puun DBH:n määrittäminen ALS-aineistosta	60
8.13	Kaavat ja mallit	65
9	TUTKIMUKSEN TULOKSET	67
9.1	Tutkimusalueen puuston tilastollisia arvoja	67
9.2	Mitatut ja mallinnetut puustotunnukset	67
9.3	Mallinnetun biomassan hajontakuviot	71
9.4	Lineaarinen riippuvuus ja varianssien yhtä suuruus.....	72
10	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	74
	LÄHTEET	77
	LIITTEET	82
	Liite 1. FARO-laserkeilaimen tuotokuvaus ja tekniset tiedot	82
	Liite 2. Maastomittaustapahtuman varuste- ja kalustoluettelo.....	84
	Liite 3. Metsäalueen inventoinnin suunnittelu	85
	Liite 4. Mittaustapahtuman kartoitus	86
	Liite 5. AARNE 1. lähtötiedot	87
	Liite 6. Lineaaristen regressiomallien varianssianalyysien tulokset	88

LYHENTEET JA TERMIT

μm	mikrometri (aallonpituus)
B	biomassa puustotunnuksena
$d_{1.3}$	rinnankorkeusläpimitta (alaindeksinä mittauskorkeus)
h	puun pituus
p/m^2	pistettä neliömetrille
3D	Three-Dimensional Space, kolmiulotteinen
ABA	Area-Based Approach, aluepohjainen menetelmä
AGB	Above Ground Biomass, maan yläpuolinen biomassa
ALS	Airborne Laser Scanning, ilmalaserkeilaus
AOGA	Act on the Openness of Government Activities
CHM	Canopy Height Model, latvuston korkeusmalli
CSF	Cloth Simulation Filter, simulointi algoritmi
DBH	Diameter at Breast Height, rinnankorkeusläpimitta
DEM	Digital Elevation Model, digitaalinen maastomalli
DSM	Digital Surface Model, digitaalinen pintamalli
DTM	Digital Terrain Model, kts. DEM (interpoloitava)
IRS	Inertial Reference System, inertiasuunnistus
ITD	Individual Tree Detection, yksinpuintulkinta
k-NN	k-Nearest Neighbour, k:n lähimmän naapurin algoritmi
LASER	Light Amplification by Simulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging, valotutka
PVTUTKL	Puolustusvoimien tutkimuslaitos
RANSAC	Random Sample Consensus
RMSE	Root Mean Square Error, keskineliövirheen neliöjuuri
STRS	Single Tree Remote Sensing, yksinpuintulkinta
TIFF	Tagged Image File Format, häviötön tiedostomuoto
TLS	Terrestrial Laser Scanning, maalaserkeilaus
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus
absorptio	säteilyn ja molekyylien törmäys, jossa molekyyli imee itseensä säteilyä
additiivinen	yhteenlaskettava, lisäävä

alkio	populaation (perusjoukon) osa
allometria	organismin eri osien kasvuvauhti ontogeenisessä prosessissa
eteläboreaalin	pohjoinen ilmastovyöhyke
georeferointi	esim. kartan kiinnittämistä paikkaan
harha (tilast.)	estimaattorin odotusarvon poikkeama estimoitavan parametrin arvosta
heterogeeninen	epäyhtenäinen, sekakoosteinen
homogeeninen	yhtenäinen, tasakoosteinen
kartesinen	kolmen ulottuvuuden (x-, y- ja z-akselit) mukainen suorakulmainen koordinaatisto
koherenssi (fys.)	saman taajuuden ja aaltomuodon aallot
kojeasema	mittalaitteen asemapiste
kvantifioida	muokkaaminen määrälliseen muotoon
mallintaminen	reaalimaailman eliön, esineen tai ilmiön esittämistä/visualisointia muulla tavalla kuin sillä itsellään
numeerinen	numeroina käsiteltävissä tai laskettavissa oleva
okklusio	lasermittauksissa syntyvä katve
ontogenia	yksilönkehitys
operatiivinen	organisaation päivittäisen toiminnan johtaminen
otos (tilast.)	näytejoukko
pistepilvi	useista pisteistä muodostunut pistejoukko
populaatio	rajattu oliojoukko, jonka ominaisuuksista ollaan kiinnostuneita
referenssitieto	tieto, johon voidaan viitata
resoluutio	esitetyn kuvan erotuskyky, eli yksityiskohtien tai pikselien lukumäärä
runkokäyrä	puun kapeneminen pituuden funktiona
segmentoida	digitaalisen kuvan alan jakaminen mielekkäisiin osiin
sironta	satunnaista säteilyn suunnan muuttumista
skaalautua	kasvaa/pienentyä samassa suhteessa kuin jokin muu
takymetri	mittalaite, jolla mitataan säteittäisesti pisteiden sijainteja kojeeseen nähden
tietojohdaminen	arvon luomista, joka perustuu aineettomiin resursseihin kuten tietoon ja osaamiseen (vrt. tiedolla johtaminen)

1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa tietojohtamisen rooli tulee korostumaan operatiivisessa metsänhoidossa. Päätökset tehdään monesti perustuen keskiläpimittaan, puuston keskipituuteen tai ikään, ja puutteellinen tai epätarkka tieto näihin puustotunnuksiin liittyen lisää metsätalouden operaatioiden kustannuksia ja haasteita (Kankare ym. 2014, 89; Holopainen 2019, 2).

Ilmalaserkeilaus, ja vielä erityisemmin, maanpäälliset laserkeilaimet, tarjoavat tehokkaan ja objektiivisen tavan hankkia tarkkaa kolmiulotteista (3D) kenttämitaustietoa. Riippuen katselukulmasta ja pistetiheydestä, laserkeilauksella voidaan mallintaa metsikön rakenne, ja jopa yksittäisten puiden jakautuminen osiin, esim. runkoon, oksiin tai neulasiin, erinomaisella tarkkuudella. Maalaserkeilaus on varteenotettava vaihtoehto, kun halutaan tarkkaa referenssitietoa metsikön tunnuksista ilman, että puustoa joudutaan hakkaamaan. Näin myös biomassamuutosten seurannan mahdollisuus säilyy.

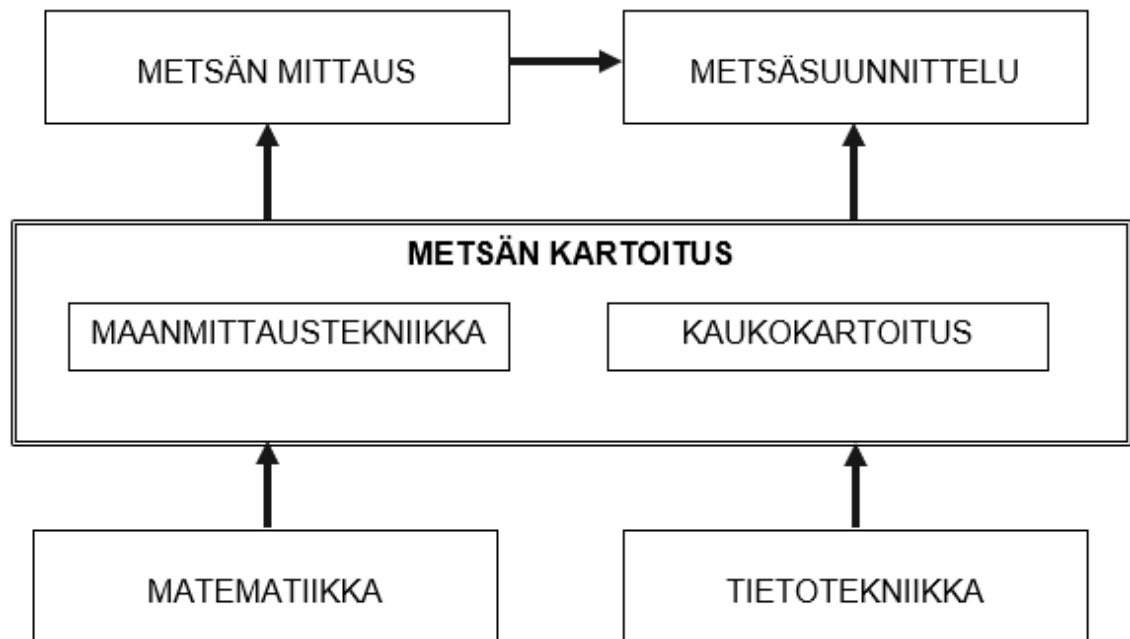
Tämän opinnäytetyön päätavoitteena on tarkastella olemassa olevia laserkeilausmenetelmiä puustotunnusten ja biomassan määrittämisen välineenä, sekä selvittää biomassan määrän mahdollisimman tarkasti eri laserkeilausmenetelmillä tuotettujen pistepilvien avulla. Opinnäytetyön on hankkeistanut Puolustusvoimien tutkimuslaitos (PVTUTKL) organisaation sisäisten intressien pohjalta. Työ on myös linjassa ministeriöiden osaamispohjaa kehittävien tavoitteiden kanssa, joissa on korostettuna laserkeilaukseen liittyvä osaaminen (Tiilikainen, Vuorenvirta, Kutinlahti & Vilén 2019, 15, 30).

Tämän opinnäytetyön tutkimuksen kohteena on Maanmittauslaitoksen (MML), ilmalaserkeilatun, tiheäpulsseisen (5 pistettä/m²) laserkeilausaineiston vertailu, huomattavasti korkeamman pistetiheyden (n. 25 000 p/m²) maalaserkeilaimella tuotettuihin laserkeilausaineistoihin. Tarkoituksena on tuottaa PVTUTKL:lle perustutkimusta tukevaa tietoa laserkeilaukseen ja biomassaan liittyen heidän määrittämältään metsäalueelta.

2 KAUKOKARTOITUS JA PAIKKATIETO

2.1 Kaukokartoitus käsitteenä

Kaukokartoitus, johon tämä tutkimustyö suurelta osin keskittyy, on etäällä olevan kohteen tunnistamista, sen määrän, laadun ja tilan arviointia. Kaukokartoituksessa sähkömagneettinen säteily on käytännössä ainut tiedon välittäjä (Pukkala 1988, 9). Saatu tieto on peräisin kohteesta heijastuneesta tai kohteen itsensä lähettämästä säteilystä (Auvinen, Pukkala, & Vesa 1997, 61). Tässä opinnäytetyössä hyödynnetään laserkeilausta, joka on vain yksi kaukokartoitusmenetelmistä. Muita esimerkkejä kaukokartoituksessa käytetyistä tiedonkeruumenetelmistä ovat mm. ilmavalokuvaus, satelliittikuvaus ja tutkakuvaus. Maanmittaustekniikkaa ja kaukokartoitusta ei voida raa'asti erottaa toisistaan (kuvio 1).



KUVIO 1. Metsän kartoituksen pääosat ja eri osien hierarkkiset suhteet (Auvinen 1997, 1, muokattu)

Passiivisessa kaukokartoituksessa käytetään ilmaisimia (esim. kamera), jotka keräävät kohteen emittoimaa (lähettämää) tai heijastavaa säteilyä, kun taas aktiivisissa järjestelmissä on jokin säteilyn lähde, joka valaisee kohteen (esim.

tutka). Perinteisesti kaukokartoituksen apuna on käytetty jotakin referenssitietoa. Referenssitietoa voi olla maastossa tehdyt mittaukset tai muusta lähteestä hankittua aputietoa tulkinnan tukena. (Kangas, Päivinen, Holopainen & Maltamo, 2011, 129.)

2.2 Kaukokartoituksen edut ja rajoitukset

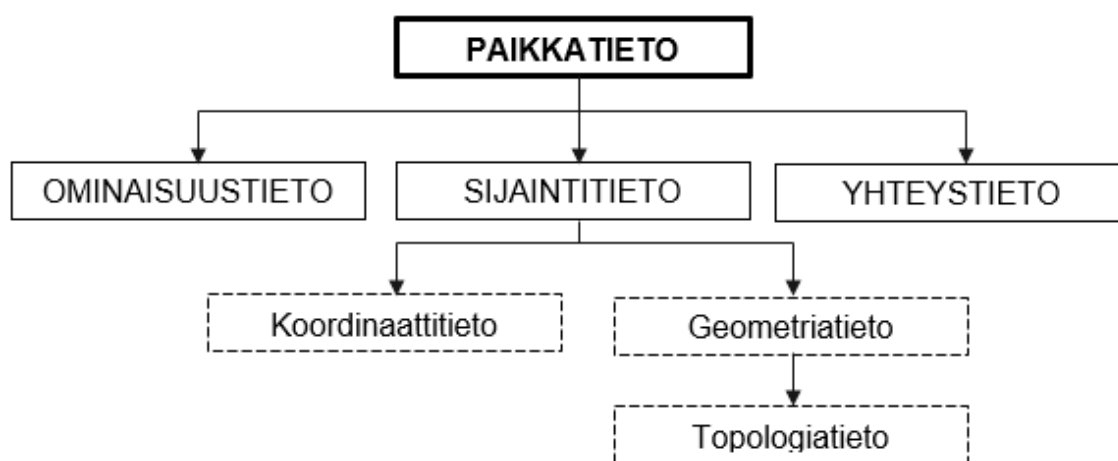
Kaukokartoituksen etuina voidaan pitää sen suhteellisen alhaisia yksikkökustannuksia, kun menetelmää verrataan perinteiseen maastossa tehtyihin inventointeihin (Kangas ym. 2011, 129). Erityisesti ilmalaserkeilaus (ALS, Airborne Laser Scanning) -menetelmä kasvattaa suosiotaan operatiivisessa metsätaloudessa. ALS-mittauskampanjoiden kustannukset ovat melko alhaiset (n. 0.5–1 €/ha Suomen osalta) harvapulssisen aineiston (< 2 p/m²) osalta (Kankare ym. 2013b, 72).

Kaukokartoituksen ekonominen yliveraisuus pätee erityisesti laajoihin ja vaikeakulkuisiin alueisiin, joilta saadaan suurin hyöty. Muita merkittäviä etuja ovat numeeristen kaukokartoitusaineistojen analyysit (objektiivisuus), sekä ihmisilmälle näkymättömien aallonpituusalueiden havainnointi. Keskeisimpiä rajoittavia tekijöitä ilmasta käsin tehdyllä kaukokartoituksella on kuitenkin monet geofyysikaaliset muuttujat (ilmakehän vaikutukset) sekä aineiston geometrinen erotuskyky ja tarkkuus. (Auvinen 1997, 64–68.) Yhtenä haittapuolena voidaan myös pitää sitä, ettei aineistojen visuaaliselle kuvatulkinnalle ole selviä tai ehdottomia raameja, minkä seurauksena menetelmän objektiivisuus muuttuukin aina subjektiiviseksi, kun yhtälöön sisällytetään ihmisen toteuttama visuaalinen aineiston analysointi.

Kaukokartoitusjärjestelmän hyvyyden mittareita ovat tarkkuus ja erotuskyky. Tarkkuuden määrittelee geometrinen (spatiaalinen) tarkkuus, joka ilmaisee kohteen paikkasidonnaisuuden maastossa. Geometrinen erotuskyky ilmoittaa pienimmän kuvasta erottuvan kohteen koon. Epätarkka kuva voi siis olla terävä – ts. geometriseltä erotuskyvyiltä hyvä – ja tarkka kuva voi olla epäterävä. (Pukkala 1988, 6.) Voimme siis erottaa esim. puut ja jopa puulajit terävästi ilmakuvilta, mutta ne eivät sijaitse tarkasti oikeissa koordinaateissa.

2.3 Paikkatieto

Paikkatieto on nimensä mukaisesti määrättyyn sijaintiin sidottua tietoa. Paikkatieto koostuu sijaintitiedosta (spatiaalinen tieto), ominaisuustiedosta (attribuuttitieto) sekä yhteystiedosta (kuvio 2). Sijaintitieto sisältää kohteen paikannukseen tarvittavan tiedon, esimerkiksi koordinaattiparin (x, y), geometriatiedon, topologiatiedon tai osoitteen. (Eskola & Peltoniemi 2011, 34.) Paikkatiedossa geometriatietoa on mm. piste, viiva tai alue, kun taas topologiatietoa ovat kohteiden hierarkia ja sijainti suhteessa toisiinsa (Tokola ym. 1994, 8–9, 14–16; Tokola ym. 2000, 7).

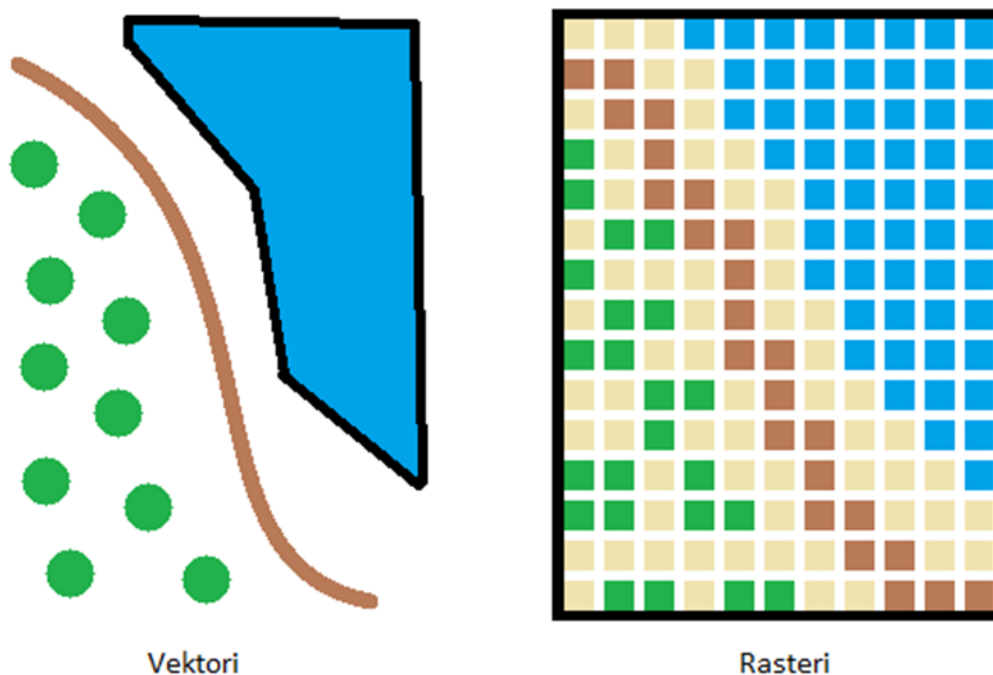


KUVIO 2. Paikkatiedon osat (Auvinen 1997, 139, muokattu)

Ominaisuus- eli attribuuttitieto kuvaa kohteen tunnuksia ja ominaisuuksia. Tyypiltään ominaisuustieto voi olla yksilöivää (puulaji), paikantavaa (osoite), kuvailevaa (kehitysluokka) tai ajoittavaa (ojituksesta kulunut aika) (Auvinen 1997, 139–140). Yhdistettäessä spatiaalinen-, ominaisuustieto- ja yhteystieto samaan järjestelmään, on kyseessä paikkatietojärjestelmä eli GIS.

On olemassa kaksi yleisluonteista tapaa mallintaa reaali maailmaa ja esittää kohteita paikkatietojärjestelmässä. Ne ovat rasteri- ja vektorimalli (kuvio 3). Rasterimuotoinen aineisto koostuu riveistä ja sarakkeista soluja, joista jokaiselle on määritelty jokin attribuutillinen tai numeraalinen arvo. Rasteritiedoston resoluutio on sen solujen leveys maaperän yksikköinä. Rasteriaineistoista puhuttaessa, puhutaankin usein rasterikuvista. Esimerkiksi LiDAR (Light Detection and

Ranging, valotutka) -rasterikuvassa jokainen solu voi olla pikseli, joka edustaa 3 m x 3 m aluetta todellisuudessa. (Kalkhan 2011, 25)



KUVIO 3. Vektori- ja rasterimalli

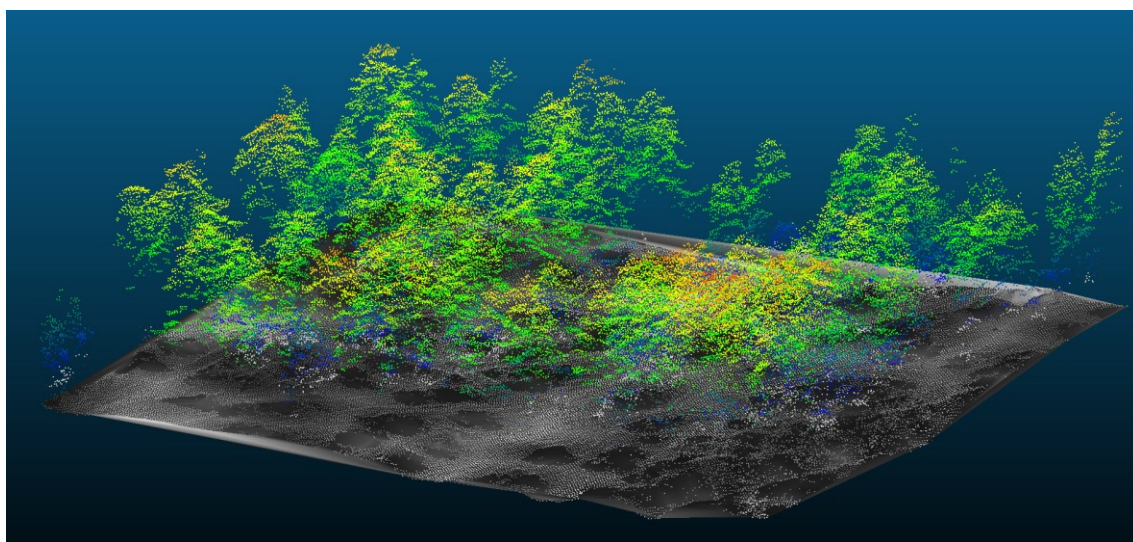
Vektorimuotoinen tieto käyttää geometrisia muotoja, kuten pisteitä (esim. puut, kaivot, lipputangot), viivoja tai polygoneja (viivojen sulkemia alueita, esim. järvet tai pellot). Pistepilvet ovat siis vektorimuotoista tietoa, koska ne koostuvat pisteistä. Rasteri- ja vektoritiedostojen keskeisin ero piilee niiden esitettävyydessä; Rasteriaineistot ovat tiedostokooltaan suuria, koska jokainen ruutu pitää sisällään arvon. Rasterikuvat voivat olla resoluutioltaan erittäin tarkkoja. Vektoriaiaineistot taas ovat tiedostokooltaan pienempiä ja niiden käsittely on nopeampaa. Rasteriaineiston luettavuus kärsii uudelleenskaalautumisesta, sillä se on tuotettu vain yhteen mittakaavaan, kun taas vektoriaiaineisto on vapaasti skaalautuvaa. (Hirvensalo n.d) Vektoriaiaineistolla pystytään myötäilemään reaalimaailman kohteiden muotoja tarkemmin, kun taas rasteriaineistolla luonnollisten kohteiden rajat kuvautuvat kulmikkaiksi.

3 LASERKEILAUS

3.1 Laserkeilauksen periaate

Tekemällä valo samanvaiheiseksi, eli koherentiksi, saadaan aikaan hyvin voimakasta säteilyä, jota voidaan käyttää mm. kaukokartoituksessa. Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) on koherenttia valoa tuottava laite. Käytettävä valo on monokromaattista, ts. yhtä aallonpituutta. Esim. rubiinilaserin aallonpituus on 694 tai 347 μm ja hiilidioksidilaserin 10.6 μm . (Pukkala 1988, 81.)

Laserkeilaus perustuu laserkeilaimen ympäristöään kohti lähettämään ja ympäristöstä takaisin heijastuneeseen laserpulssiin. Kyseessä on siis aktiivinen, tutkaan verrattavissa oleva kaukokartoitusjärjestelmä. Mitattavasta kohteesta muodostuu kolmiulotteinen näkymä, pistepilvi (kuva 1), jossa on jopa miljoonia pisteitä. Pistepilvessä jokaisella pisteellä on x-, y- ja z-koordinaatit. Tämä karteesiin koordinaatistoon tallennettava 3D-tieto tekee laserkeilausaineistosta erityisen hyödyllisen metsätalouden sovelluksissa (Vosselman & Maas 2010, 213.)



KUVA 1. ALS-menetelmällä tuotettu pistepilvi (pulssitiheys 5 p/m²), jossa pisteiden värikoodit skaalattuna korkeusmallin mukaan.

Lasersäteen lähtöpiste on mittalaitteen nollapiste, eli origo. Ympäristöstä takaisin mittalaitteelle heijastuneet pisteet saavat koordinaatit origon mukaan. Lasersäteen lähtöpaikka (mittalaitteen sijainti) voidaan erikseen mitata satelliittipaikannuksen avulla, mutta itse laserkeilain ei tarvitse satelliittipaikannusta toimiakseen. Laserkeilaimet pystyvät myös tallentamaan palaavien lasersäteiden intensiteetin, jonka perusteella pisteet saavat sävyarvon, mikä helpottaa aineistojen tulkinnaissa. Intensiteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kohteen väri, materiaali, pinnan tasaisuus ja säteen osumiskulma. (Holopainen, Hyyppä & Vastaranta 2013, 11–16; Cronvall, Kråknäs & Turkka 2012, 10–11.)

Etäisyysmittausmenetelmiä on kahdenlaisia; valon kulku-aikaa mittaavat laserkeilaimet, sekä vaihe-erokeilaimet. Koje tallentaa ja laskee etäisyysmittausperiaatteesta riippuen etäisyyden kohteeseen. Pisteiden sijoittaminen karteesisen koordinaatistoon (x-, y- ja z-akseli) onnistuu, koska yksittäisen säteen lähtökulmat (vaaka- ja pystykulma) tiedetään. (Bailey & Ochoa 2018, 134.)

Laserkeilain on optinen laite, mitaten ne pinnat, jotka ihminenkin näkee. Pistepilven rakentumiseen vaikuttavat siis suuresti kiinteät olosuhdetekijät, kuten lumi, vesisade ja pöly. Mittaustulosten virheellisyys johtuu mm. lasersäteiden ennenaikaisista heijastumisista, absorboitumisista tai poikkeutumisista. (Cronvall ym. 2012, 11.)

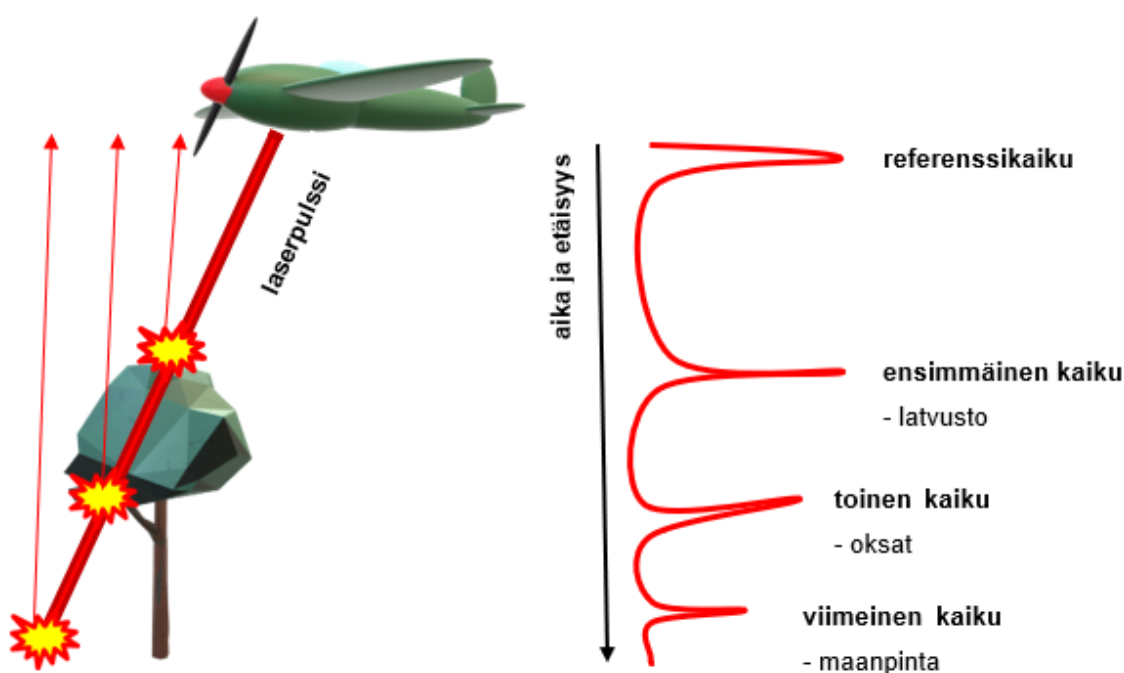
3.2 Ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilausta tehdään yleensä lentokoneesta tai helikopterista käsin. Paikallisesti myös dronet/UAV (Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma alus) -alukset ovat käytössä. Laserkeilaimen tukena ovat satelliittipaikannus ja IRS (Inertial Reference System, inertiasuunnistus) -järjestelmä, joista jäljemmän tehtävänä on seurata koneen asentoa. Ilmalaserkeilausaineistoja voidaan kerätä diskreettinä (irralisena/erillisenä) tai täydellä aaltomuodolla varustettuna.

3.3 Ilmalaserkeilauksen ominaisuuksista

Keilain lähettää laserpulssin mitattavaa kohdetta kohti; osa laserpulssista heijastuu maasta, osa taas puun eri osista. Metsää mitattaessa ensimmäinen kaiku (first echo) saadaan laitetta lähimpänä olevasta kohteesta (esim. puun latva) ja viimeinen kaiku (last echo), joka on laitteesta kauimpana (esim. maanpinta). Useamman paluukaiun tallentaminen on monesti hyödyllisempää, kuin vain yhden, sillä puuston korkeusmallin luominen helpottuu.

Laserpulssi osuu monesti ensin lehvästöön, eli puun latvaan, josta se osittain jatkaa matkaansa läpäisten puun muita osia, kuten oksia, runkoa tai lehtiä, osuen lopulta maahan. (kuvio 4) Tapahtumasarja saa aikaan useampia paluukaikuja, joka helpottaa metsikön rakenteen mallintamista. Tieto oletetuista latvusten sijainneista, sekä tieto oletetusta maanpinnan sijainnista mahdollistaa digitaalisen maastomallin (DTM, Digital Terrain Model), kuin myös puuston korkeusmallin luomisen.



KUVIO 4. Laserpulssin ja puuston vuorovaikutus

4 MML:N ILMALASERKEILAUSAINEISTOT

4.1 Vanhan inventointikierron laserkeilausaineisto

Ennen kansallisen laserkeilausohjelman (KALLIO:n) käynnistymistä (2020) Maanmittauslaitos on tuottanut koko Suomen kattavaa paikkatietoa vuodesta 2008 lähtien, joka myöhemmin vuonna 2013 luokiteltiin vapaasti jaeltavaksi ja ilmaiseksi. Tämä ALS-aineisto on harvapulssista $0,5 \text{ p/m}^2$, jolloin pisteiden etäisyys toisistaan on enintään 1,4 m. Erityisesti biomassakartoituksen näkökulmasta avoimen ALS-aineiston merkittävimpiä ongelmia ovat aineiston osittainen vanhentuminen sekä osaltaan myös lehdettömään aikaan tehdyt kuvaukset. Saman tarkkuusluokan aineistoa, sekä yhtä lailla avointa aineistoa tuotetaan jatkuvasti kansallisen laserkeilausohjelman mukaisesti. Kyseessä on kuitenkin eri aineisto, sillä vaikka tarkkuusluokka on sama kuin edeltäjänsä, on aineisto kuitenkin harvennettu tiheämpipulssisesta (5 p/m^2) aineistosta. (MML n.d.)

4.2 Uuden laserkeilausohjelman laserkeilausaineisto

Keväällä 2020 aloitetun valtakunnallisen laserkeilausohjelman mukaisesti tuotettu uusi ja tiheämpi (5 p/m^2) laserkeilausaineisto kuuluu rajoitetun jakelun piiriin. Itse aineisto on maksutonta, mutta sen hyödyntäminen vaatii käyttöluvan, eli lisenssin. Lisäksi on olemassa karttalehtiä, joiden laserkeilausaineistot on harvennettu $0,3 \text{ p/m}^2$ -tiheyteen. Vastaavat alueet kuuluvat alueevalvontalain (755/2000) rajoitealueille, joiden aineistot voi saada käyttöönsä vain hakemalla lupaa puolustusvoimilta. (MML n.d.)

MML:n ALS-aineiston kuvaukset suoritetaan usein varhain keväällä lehdettömänä aikana. Syynä tähän on lähinnä se, että maanpintamalli halutaan tuottaa mahdollisimman hyvin (Kankare ym. 2015, 24). Metsäkuvaukset, eli ilmavalokuvaukset taas suoritetaan pääsääntöisesti puiden ollessa täydessä lehdessä. MML:n jakelemisissa laserkeilausaineistoissa pistepilvien pisteet ovat automaattisesti luokiteltuja esim. maanpinta- ja kasvillisuuspisteisiin (MML n.d.). Pisteluokat on esitetty taulukossa 1, josta työn kannalta olennaiset pisteluokat on korostettu.

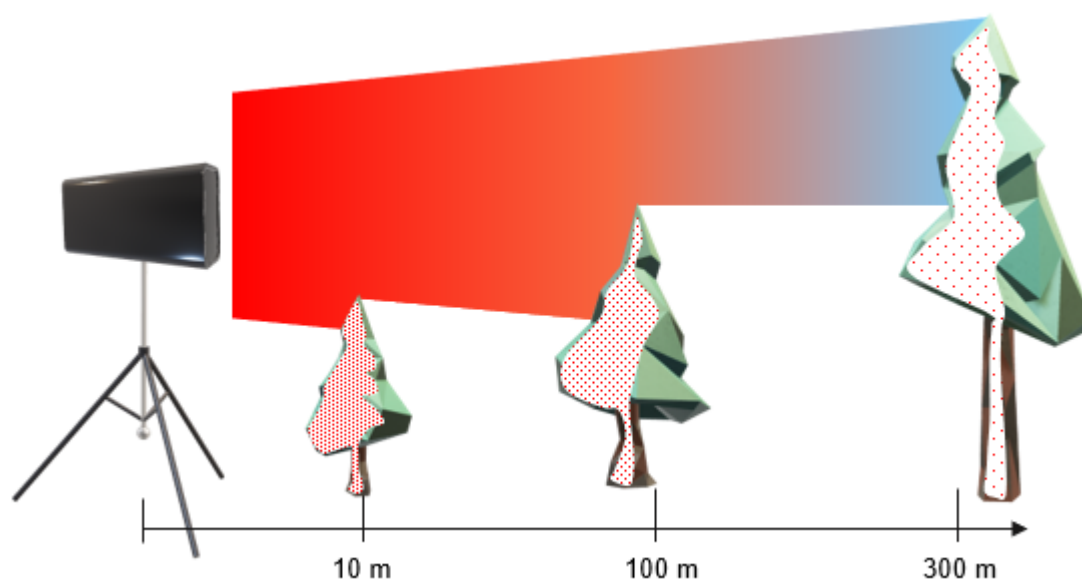
TAULUKKO 1. Maanmittauslaitoksen pisteiden viralliset LAS 1.2 -formaatin mukaiset arvot sekä luokat (MML n.d., muokattu)

Luokan nimi	luokan nimi englanniksi	Luokan nro	Selite
Luokittelematon	<i>Unclassified</i>	1	Lähtötilanteessa kaikki pisteet ovat tässä luokassa, ja lopputilanteessa pisteet, joiden luokka ei muutu.
Peittoalue	<i>Overlap</i>	12	Lentojonojen päällekkäisiltä alueilta saadut pisteet, joita hyödynnetään vain lähinnä lentojonojen yhteensovittamiseen.
Syrjäiset, eristyneet pisteet	<i>Isolated</i>	16	Yksittäisiä pisteitä ilmassa ja maan alla. Piste kuuluu kyseiseen luokkaan, mikäli 5 m säteellä sen ympärillä on ≤ 10 pistettä.
Matalat virhepisteet	<i>Low point</i>	7	Automaattisen luokituksen mukaan liian alhaalla suhteessa lähiympäristön muihin pisteisiin.
Maanpintapisteet	<i>Ground</i>	2	Alin pinta, joka ilmasta käsin on havaittavissa.
Ilmapisteet	<i>Air points</i>	15	Ilmassa olevat kohteet, kuten pilvet tai ilma-alukset.
Virhe-, vika- tai häiriöpisteet	<i>Fault points</i>	17	Automaattiluokituksen jälkeen jäljelle jäävät keilainhäiriöpisteet.
Jäljelle jääneille (default-class, suom. oletusarvoluokka) pisteille tehdään korkeustasoluokittelu:			
Matala kasvillisuus*	<i>Low vegetation</i>	3	Pisteet jotka ovat 0.0 – 0.5 m maanpinnan yläpuolella.
Keskikokoinen kasvillisuus*	<i>Medium vegetation</i>	4	Pisteet jotka ovat 0.5 – 2.0 m maanpinnan yläpuolella.
Korkea kasvillisuus*	<i>High vegetation</i>	5	Pisteet jotka ovat 2.0 – 50.0 m maanpinnan yläpuolella.
*Luokat sisältävät muutakin kuin kasvillisuutta, kuten esim. kiviä, rakennuksia, vaikka luokan nimi antaa toista ymmärtää.			

5 MAANPÄÄLLINEN LASERKEILAUS

5.1 Maalaserkeilaimen mittausperiaate

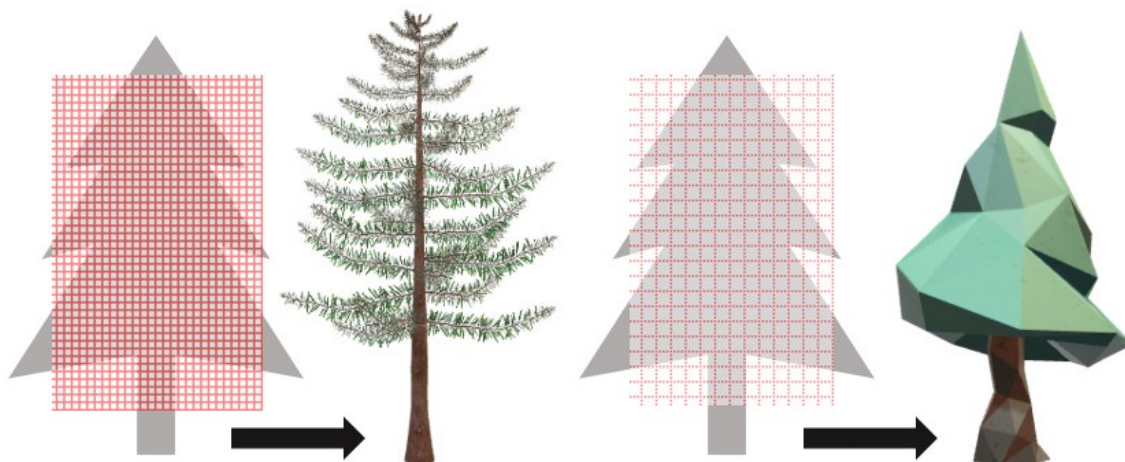
Maalaserkeilauksessa mittaus tapahtuu nimensä mukaisesti maanpinnalta. Laitteen mittaustapa on staattinen, eli laite ei liiku asemapaikastaan mittauksen aikana. Laite koostuu keilainosasta, pakkokeskitysalustasta ja jalustasta. Monesti keilainosa pitää sisällään myös digikameran. Tyypillisesti maalaserkeilain on sijoitettuna kolmijalan, eli tripodin päälle. Maalaserkeilain mittaa pisteitä huomattavasti tiheämmin kuin tämänhetkiset ilmalaserkeilaininstrumentit. Pistetiheys on tuhansia pisteitä neliömetrille (Kuželka, Slavík, & Surový, 2020, 1–3). Tuloksellinen mittausetäisyys vaihtelee metreistä muutamiin satoihin metreihin. Maalaserkeilaimen origosta loitonnuttaessa myös pistetiheydet harvenevat (kuvio 5); pisteiden välimatka siis kasvaa.



KUVIO 5. Pistetiheyden harveneminen etäisyyden kasvaessa ja katvealueen vaikutuksia

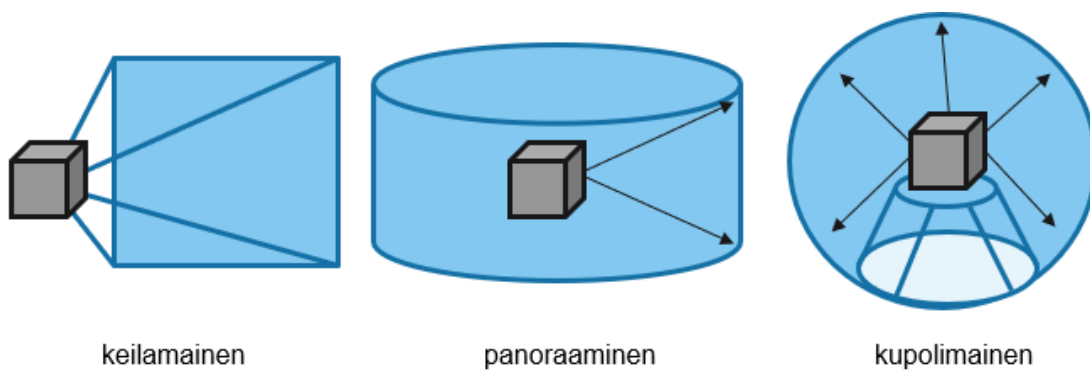
Kojeen tekniset ominaisuudet määrittelevät sen soveltuvuuden kulloiseenkin tarkoitukseen. Soveltuvuutta arvioidaan yleisesti mittausetäisyyden, kulmaresoluution, lasersäteen divergenssin (säteen hajoamiskulman) ja keilauskulman perusteella. Mitä parempi kulmaresoluution, sitä paremmin laite kykenee toistamaan kohteen yksityiskohtia (kuvio 6). (Cronvall ym. 2012, 16.) Kohteet ovat

siis paremmin mallinnettavissa. Keilauskulma vaikuttaa erityisesti mittausprosessin ajanmenekkiin.



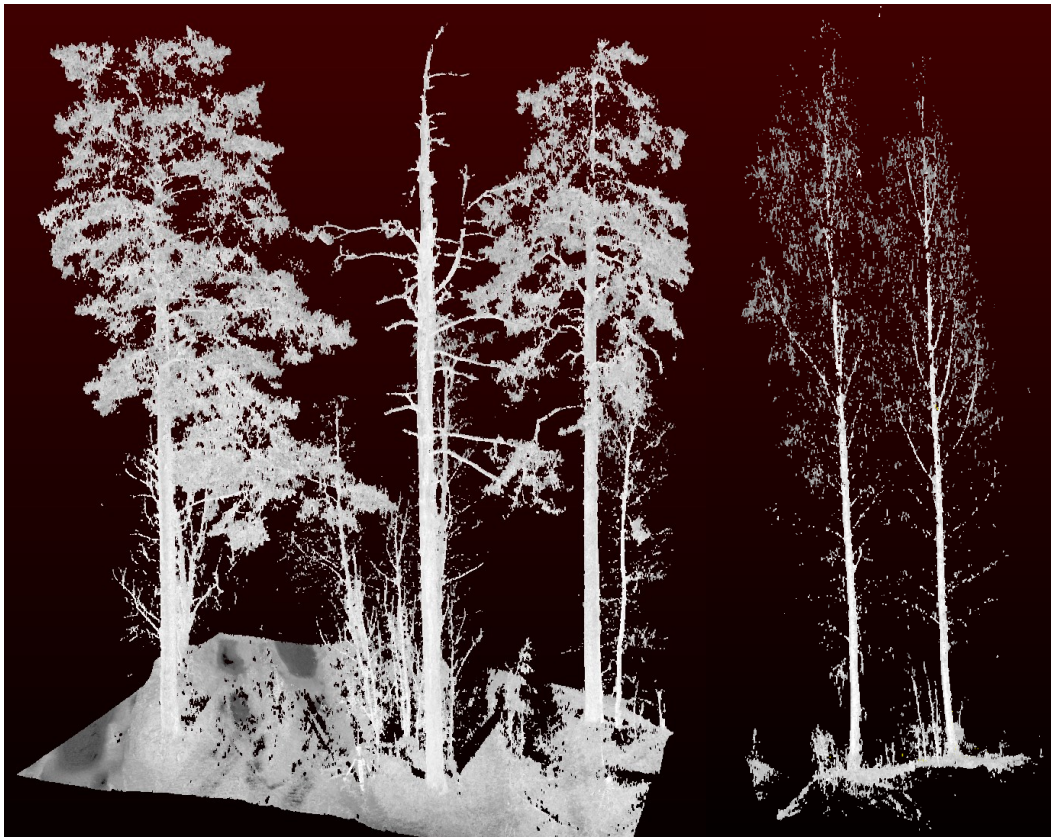
KUVIO 6. Karkea esimerkki kulmaresoluutiosta ja säännöllisen ruudukon (grid) mittausperiaatteesta.

Kapealla näkemällä (keilamainen näkemä) varustetut keilaimet ovat nykypäivänä harvinaisempia. Nykyisin lähes kaikki maalaserkeilaimet pystyvät mittaamaan kupolimaisesti (kuvio 7).



KUVIO 7. Maalaserkeilainten näkemätyyppejä (Cronvall 2012, 18, muokattu)

Maastolaserkeilausmenetelmillä päästään hyvin tarkkoihin mittaustuloksiin puutasolla (kuva 2), ja jopa oksatasolla riittäviin tuloksiin (Kankare ym. 2015, 23). Mittalaitteen tuottama korkea pistetiheys (n. 25 000 p/m²) mahdollistaa paremman puulajitunnistuksen.



KUVA 2. Kuvassa vasemmalta oikealle: männyn, kelo, männyn ja koivut.

Pistepilvien hajonta ja intensiteetti on yksi merkittävimmistä laatumittareista. Hajontaan vaikuttaa lasersäteiden osumiskulma kohteeseen. Mitä pidempi mittausmatka, sitä heikompi mittalaitteelle palaava signaali on. Matkan lisäksi paluusignaalin voimakkuuteen vaikuttaa myös kohteen pinnan ominaisuudet. (Cronwall ym. 2012, 19.)

Yleisesti hyväksytty sääntö on, että mitä tiheämpi pistepilvi mittaustapahtumasta saadaan talteen, sitä tarkemmin kyetään mallintamaan kohteita. On kuitenkin muistettava myös se tosiasia, että mikäli pistepilven pisteiden spatiaalinen tarkkuus, eli pisteiden sijainti koordinaatistossa on huono, ei tuotetusta pistepilvestä ole välttämättä mitään hyötyä.

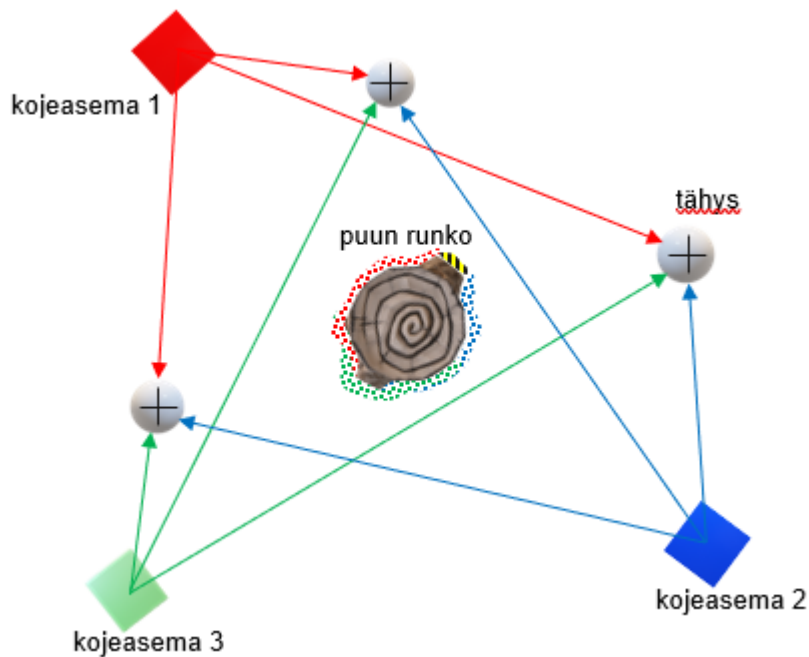
Maalaserkeilauksessa yksi keskeisimmistä haasteista on osittaisten tai kokonaisten katvealueiden, eli okklusion syntyminen. Koje ei kykene näkemään kohteiden lävitse, joten syntyy siis katvettä, josta pisteitä ei tallennu (kuva 3).



KUVA 3. Kojeen staattisuutta ja optisuutta havainnollistaa puiden takana esiintyvät katvealueet.

Metsä on lähtökohtaisesti monimuotoinen ympäristö. Monimuotoisessa ympäristössä voi pyrkimykset kaikkien katvealueiden välttämiseksi osoittautua turhiksi. Varsinaisen suunnittelutyön tärkeyttä tämä seikka ei kuitenkaan poista. Moni kohde vaatii katvealueiden välttämiseksi useamman kojeaseman (multi scan). Syntyy siis useampia pistepilviä, jotka on tarkoitus yhdistää yhdeksi isommaksi pistepilveksi.

Tämä onnistuu esim. käyttämällä tähyksiä (kuvio 8), joita voivat olla tasomaiset (tarra- tai prismatähykset), pallomaiset tai puolipallotähykset. Kojeasemat sijoitetaan siten, että kojeasemat näkevät samat tähykset pistepilvien yhdistämiseksi. Kuviossa on pyritty havainnollistamaan kolmen eri kojeaseman (pun., sin. ja vihr.) tuottamat pistepilvet samasta kohdepuun rungosta. Pistepilvien käsittelyssä käytetyn ohjelmiston automatiikka pyrkii tunnistamaan tähysten keskipisteet. Yksittäisiltä kojeasemilta tuotettujen pistepilvien yhdistämistä, yhdeksi pistepilveksi samaan koordinaatistoon, kutsutaan rekisteröimiseksi. Tähysten keskipisteet on mitattava myös takymetrillä, jotta pistepilvien koordinaattien siirtäminen/sitominen haluttuun paikkatietokoordinaatistoon onnistuu.



KUVIO 8. Yhteisten tähysten käytön periaate; Esimerkkitalanteessa muodostuva katvealue on huomioraidoitettu.

Maastolaserkeilaus soveltuukin metsävaratiedon tuottamisen osalta erityisen hyvin maastoreferenssitiedon tuottamiseen (Holopainen 2019, 4). Automaattisilla mittauksilla pystytään tarkentamaan puutasolla monia puun tunnuksia, joita ALS-menetelmällä ei välttämättä saa riittävällä tarkkuudella mitattua. Erityisesti puun rungosta ja latvuksesta saadaan tehtyä tarkkoja mittauksia, jotka pitkään ovat edellyttäneet puun tai sen osien kaatamista ja punnitsemista. Luonnollisesti seurantamittaukset eivät siis ole onnistuneet, mikä hankaloittaa esim. biomassan määrän seurantamittauksia.

Metsikön tarkka mallinnus on aina, kojeasemien lukumäärästä riippumatta, lähtökohtaisesti haasteellisempaa, verrattuna esim. rakennettuun ympäristöön. Onnistunutta keilaustapahtumaa on määrittämässä monta seikkaa, mutta näkyvyys on yksi keskeisimmistä. Peruseriaatteen mukaan katveen vaikutuksen voidaan katsoa voimistuvan suhteessa kasvavaan runkotiheyteen ja laskevaan rinnankorkeusläpimittaan (Liang ym. 2018, 141, 148). Liang ym. (2018, 142) ovat määritelleet kohdemetsikössä vallitsevien piirteiden perusteella metsäisen ympäristön eri vaikeusluokkiin (taulukko 2) Selittäviä tekijöitä ovat mm. rinnankorkeusläpimitta, runkotiheys, puun pituus ja pohjapinta-ala ja alikasvoksen määrä ja sijoittuminen.

TAULUKKO 2. Kolme eri monimutkaisuusluokkaa TLS-menetelmälle (Liang ym. 2018, 142, muokattu)

Monimutkaisuusluokka	Runkotiheys	Pohjapinta-ala	Rinnankorkeusläpimitta	Puun pituus
Helppo	592 ± 189	23.2 ± 5.9	20.7 ± 8.5	18.4 ± 6.4
Keskivaikea	968 ± 370	31.2 ± 8.6	17.2 ± 10.7	16.2 ± 7.3
Vaikea	2021 ± 553	32.3 ± 5.9	12.3 ± 7.2	13.2 ± 5.9

5.2 Sääolosuhteiden vaikutus

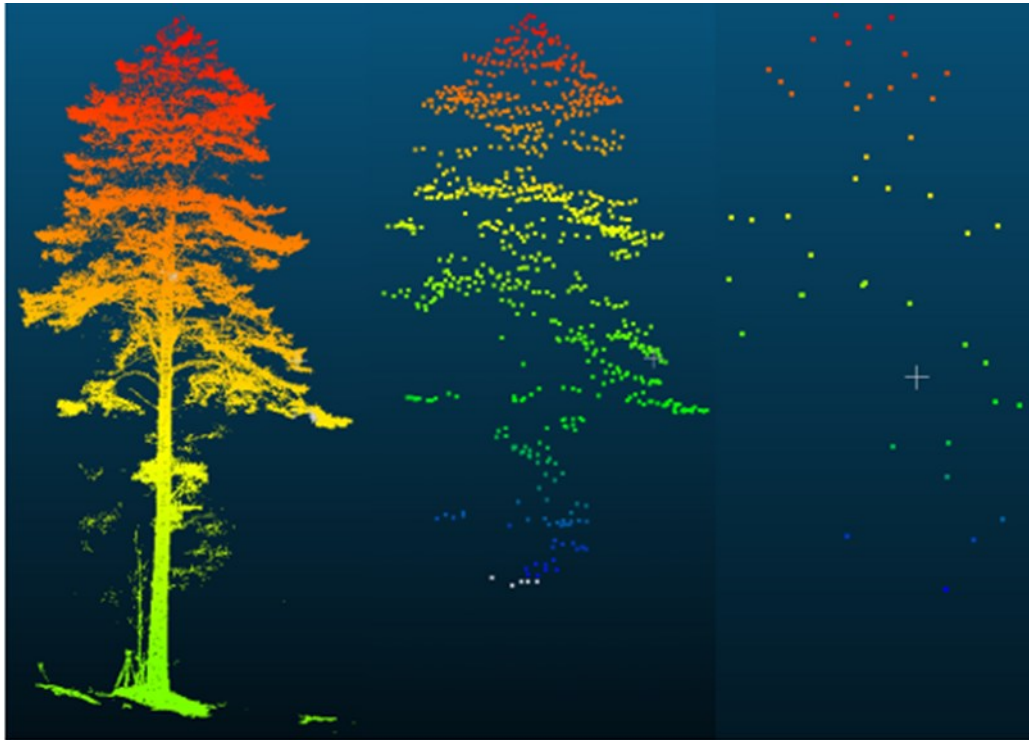
Kun tuulen nopeus ylittää >3,4 m/s, ja puiden lehdet alkavat liikkua (Kaarna 1984, 114–115), on tuulisuudella jo merkittävää haittaa keilaintapahtuman osalta, etenkin jos halutaan mallintaa lehtipuita. Tuulen nopeuden yltäessä yli 5,5 m/s, jolloin pienet oksat alkavat heilua ja tuuli nostaa pölypartikkeleja maasta (Kaarna 1984, 114–115), saattaa kasvillisuuden luonnollisten rajojen mallinnuksesta TLS-menetelmällä käydä mahdottomaksi.

Runsas sade voi estää koko keilausprosessin kokonaan, sekä kasaantunut lumi voi itsessään aiheuttaa pituus- ja biomassamittavirhettä puiden rungoille ja oksille. Paras mittausajankohta korkeusmallia luodessa on kevät tai syksy; lehdetön ja lumeton aika, jolloin myös aluskasvillisuutta on vähemmän (Eskola & Peltola 2011, 98–99). Lumi haittaa myös rinnankorkeusläpimitan mittauspisteen tarkkaa määrittämistä, sillä lumi ikään kuin ”nostaa” DTM:n pintamallia todellisesta. Lisäksi puun syntypisteen tarkka määrittäminen hankaloituu tai estyy. Lumi saattaa siis osaltaan vaikuttaa myös alhaisempiin rinnankorkeusläpimitoihin.

5.3 ALS- ja TLS-menetelmien vertailu

Maalaserkeilaimella voidaan tuottaa hyvin tiheitä pistepilviä ympäröivästä puustosta (kuva 4). TLS-mittauksilla saadaan kuitenkin katettua suhteellisen pieni alue, kun sitä verrataan ilmalaserkeilaukseen (ALS). Alueellisen kattavuuden ja pistetiheyksien merkittävien erojen lisäksi ALS- ja TLS-menetelmillä on muitakin

huomattavia eroja: eri katselukulma, mittalaitteen keskimääräinen etäisyys kohteeseen sekä mittaustapahtuman ja tiedon jälkikäsittelyn ajanmenekki. (Holopainen ym. 2011, 140.)



KUVA 4. Kuvassa sama mänty. Vasemmalta oikealle: TLS pistepilvi (n. 25 000 p/m², MML:n tuottamat ALS pistepilvet 5 p/m² ja 0,5 p/m².

Edellä mainituista seikoista johtuen, eri aineistoista suoraan mitattavissa ja mallinnettavissa puustotunnuksissa on eroja. Esim. rungon profiilin mallinnus ole harvapulssisella ALS-menetelmällä mahdollista (taulukko 3), toisin kuin maala-serkeilaus (TLS, Terrestrial Laser Scanning) -menetelmällä tuotetusta pistepilvestä (Holopainen 2019, 4). Runkoprofiili sisältää tiedot mm. runkomuodosta, rungon kaventumisista ja suoruudesta, joiden perusteella runkokäyrän mallinnus on mahdollista.

TAULUKKO 3. Yhteenveto työn ALS- ja TLS-järjestelmien keskeisistä eroista

	ALS	TLS
katselukulma (perspektiivi)	<i>Ilmasta</i>	<i>maanpinta</i>
alusta	<i>lentokone, helikopteri</i>	<i>kolmijalka</i>
puun pituus (h)	<i>Suoraan mitattavissa</i>	<i>Suoraan mitattavissa**</i>
maastomalli (DTM)	<i>Suoraan mitattavissa</i>	<i>Suoraan mitattavissa</i>
sijainti	<i>Suoraan mitattavissa</i>	<i>Suoraan mitattavissa</i>
rinnankorkeusläpimitta (DBH)	<i>Mallinnettavissa</i>	<i>Suoraan mitattavissa</i>
runkokäyrä	<i>Mallinnettavissa</i>	<i>Suoraan mitattavissa**</i>
biomassa (B)	<i>Mallinnettavissa</i>	<i>Mallinnettavissa</i>
aineiston keruun nopeus/ha	<i>Nopea</i>	<i>Hidas</i>
pisteitä tarkastelualalla yhteensä	67 666	247 572 760* → 17 088 490 (n. 6,9 %)
pistetiheys	<i>5 p/m²</i>	<i>n. 17 000 p/m²</i>
pisteiden väli	n. 40 cm	n. 2,85 cm

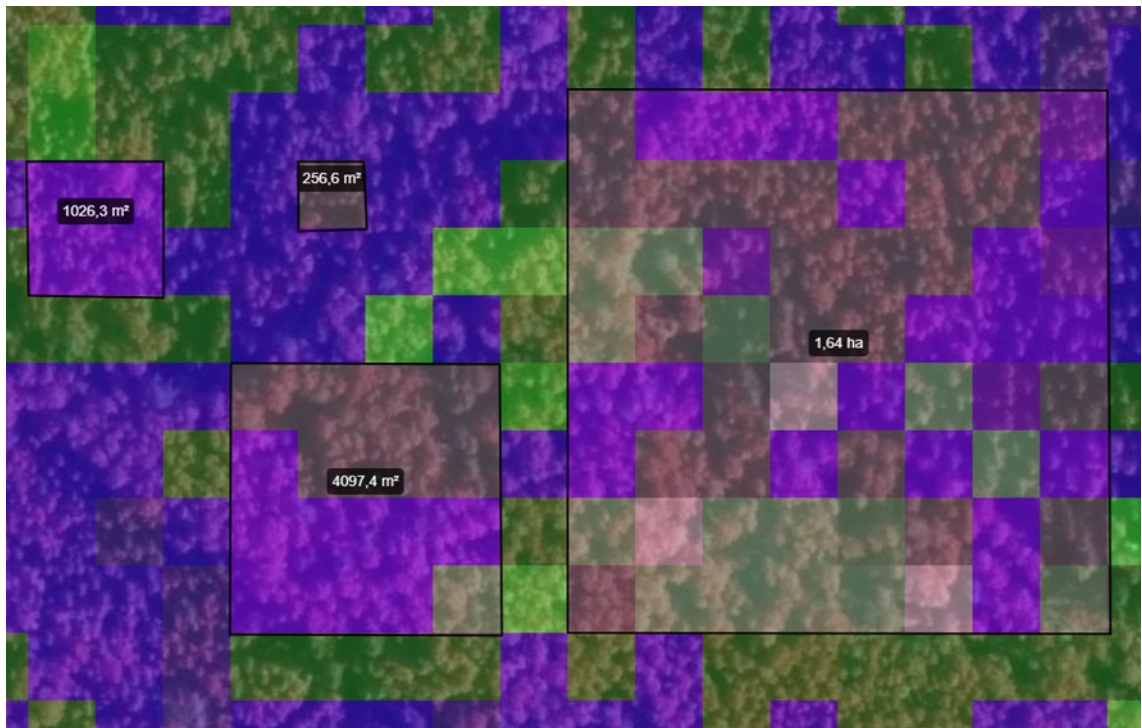
* Alkuperäisen TLS menetelmällä tuotetun pistepilven pistemäärä, jota harvennettiin alle kymmenesosaan lasketusten helpottamiseksi.

**On kuitenkin mainittava, että vaikka useammalta kojeasemalta tuotettu TLS-laserkeilausaineisto kuvaakin metsää hyvin yksityiskohtaisesti, useimmissa tapauksissa, riippumatta metsikön olosuhteista, rungot tallentuvat heikosti latvusta kohti mentäessä. Tähän vaikuttaa erityisesti katvealue-efekti ja mallinnettavien kohteiden etäisyydet kojeasemaan (Liang ym. 2018, 144)

6 PISTEPILVET METSÄNMITTAUKSESSA

6.1 Aluepohjainen puustotulkinta

Ilmalaserkeilaus soveltuu parhaiten laajojen alueiden mittaamiseen, ja yleisimmin käytetty menetelmä onkin aluepohjainen menetelmä (Area Based Approach, ABA) puustotunnusten mittaamiseksi. Osoyksikkönä toimii monesti hilaruutu (kuva 5), jonka koko on tyypillisesti 16 m x 16 m (vanha koko 20 m x 20 m), vastaten täten maastossa mitattuja referenssikoealoja.



KUVA 5. Hilaverkko ilmakuvan päällä. Yksi hilaruutu vastaa 256 m² maastossa. (Paikkatietoikkuna n.d.)

Aluepohjainen tulkinta onnistuu harvapulssisella (0.5–1 p/m²) laserkeilausaineistolla (Ärölä 2018, 290). Aluepohjainen menetelmä vaatii tuekseen vielä tois- taiseksi jonkin tilastollisiin riippuvuussuhteisiin perustuvan estimointimallin, jolla puustotunnuksia ennustetaan koeala tai kuviotasolle. Inventoitava alue on myös ilmakuvattava, sillä pelkältä harvapulssiselta laserkeilausaineistolta puulajien tunnistus on mahdotonta. Lisäksi inventoinnin ja erityisesti puustotulkinnan tueksi tarvitaan vielä referenssiaineisto; maastoon ositetun otannan periaatteella sijoitetut koealat. (Ärölä 2018, 291).

Puustotulkinnassa on erityisen tärkeää, että referenssiaineiston (koealat) ja kaukokartoitusaineiston sijaintitiedot vastaavat tarkasti toisiaan. Referenssitiedon ja koealan kohdalta kerätyn laserkeilausaineiston tietojen pohjalta pyritään ennustamaan kaikkia koealan puustotunnuksia. Mallinnuksessa käytetään usein apuna regressioanalyysiä tai esim. K:n lähimmän naapurin (k-NN, k-Nearest Neighbour) -menetelmää, jossa arvottomalle hilaruudulle lasketaan metsällisiä tunnuksia sitä lähimpänä olevien ja mitattujen hilaruutujen perusteella (Ärölä 2018, 292). Tarkastelun kohteena olevan hilaruudun laserpiirteitä verrataan siis referenssikoealojen piirteisiin, jonka jälkeen parhaiten arvottoman hilaruudun piirteitä vastaavien referenssikoealojen piirteet kopioidaan arvottomalle hilaruudulle. Lopuksi tämän hilaruudun tiedoissa painotetaan niitä koealoja, joiden piirteet parhaiten vastaavat tätä hilaruutua. (Ärölä 2018, 292).

Kuviointi tapahtuu monesti monilähteisenä, jossa hyödynnetään vanhojen inventointien kuviointeja, ilmakuvia ja kasvillisuuden korkeutta kuvaavaa DSM (Digital Surface Model, digitaalinen pintamalli) -mallia. Segmentoinnissa kuvioille lasketaan puustotunnukset alueen sisälle jäävien hilaruutujen perusteella. Kaukokartoitusperusteinen inventointimenetelmä on puustotunnusten osalta samaa tarkkuusluokkaa, kuin perinteisellä maastomittauksella toteutettu inventointi (Ärölä 2018, 293).

6.2 Yksittäisten puiden mittaus ja tulkinta pistepilvestä

Yksinpuintulkinta vaatii tiheämpipulssisempaa (vrt. aluepohjainen) aineistoa (yli 2 p/m²) (Ärölä 2018, 290). Yksinpuintulkinnassa eli yksittäisten puiden mittaukseen perustuvissa menetelmissä mitataan tai arvioidaan yleensä täsmällisempiä puustotunnuksia (pituus, latvuksen koko, puulaji), joiden avulla taas puolestaan arvioidaan yhä tarkemmin puutunnuksia, kuten rinnankorkeusläpimittaa ja tilavuutta (Kangas ym. 2011, 25). Kun puhutaan ALS-menetelmällä tuotetusta pistepilvestä, ja erityisesti yksinpuintulkinnasta, saattaa useampijaksoisten metsien tulkinta muodostua myös ongelmaksi. Alemmat kerrokset eivät välttämättä ”näyttäydy” laserkeilausaineistossa (Kankare ym. 2014, 90).

Elämme kansallisen metsävaratiedon tuottamisen osalta murroksen aikaa. Uusi, kansallisen 2020 laserkeilausohjelman tuottama entistä tiheämpipulssisemi aineisto (5 p/m^2) mahdollistaa tulevaisuudessa metsävaratiedon tarkemman inventoinnin. Voidaan pitää kuitenkin todennäköisenä, että 5 p/m^2 -pulssitiheydellä tuotettu pistepilvi ei lähitulevaisuudessa yllä tutkijoiden keskuudessa tuloksellisen yksinpuintulkintastandardin minimikriteereihin, sillä n. 6 vuotta sitten $5\text{--}6 \text{ p/m}^2$ nähtiin perusedellytyksenä yksinpuintulkinnalle (Kankare ym. 2014, 90). Yksinpuintulkintakelpoisuuden osalta rima tulee varmasti nousemaan merkittävästi lähitulevaisuudessa sensoriteknologian kehittyessä, eikä esimerkiksi 2 p/m^2 -pulssitiheyttä pidetä enää käytännön sovelluksissa yhtä kelpoisena yksinpuintulkinnan osalta.

6.3 Pituuden arviointi pistepilvestä

Pituuden arvioinnissa, kuten monien muidenkin perustunnusten arvioinneissa laserkeilauksen avulla, syntyy monesti harhaa. Pituuden harha johtuu pääsääntöisesti kahdesta muuttujasta: puuston pituuden aliarviosta sekä maastomallin yliarviosta (Hyyppä, Holopainen, Vastaranta & Puttonen 2009, 362). Mitä harvapulssisemmalla laserkeilaininstrumentilla operoidaan, sitä harvemmin paluukaiut saadaan puun korkeimmasta kohdasta. Rehevät kasvupaikat aiheuttavan myös enemmän yliarvioita maanpinnan tasosta, sillä niissä kenttä- ja pensaskerroksen kasvillisuus on tyypillisesti runsaampaa ja samalla peitteisempää. Edellä mainituista tekijöistä johtuva harha pituusmittausten osalta on tyypillisesti $0,5\text{--}1 \text{ m}$, kun käytetään $2\text{--}8 \text{ pulssia/m}^2$ lähettävää ALS-keilainta (Hyyppä ym. 2009, 362).

6.4 Rinnankorkeusläpimitan määrittäminen pistepilvestä

Laserkeilausta ja pistepilviä käsittelevissä julkaisuissa esitetään yleensä kolme vallitsevaa menetelmää, joista kaksi on algoritmeja ja yksi manuaalinen. Yleisesti käytetyt ”puiden tunnistusalgoritmit” ovat Hough Transform - ja RANSAC (Random Sample Consensus) -menetelmät. Molemmat algoritmit ovat pistepilven piirteiden erottamiseen luotuja algoritmeja, joita monesti käytetään kuva-analytiikkaan liittyvissä prosesseissa. (Olofsson, Holmgren, & Olsson 2014,

4332). Algoritmien etuna on tietysti objektiivisuus ja nopeus, kun taas manuaalinen menetelmä on työläs ja aina subjektiivinen, mutta kuitenkin perusteltu kokenäön harhan suhteen.

Rinnankorkeusläpimitan mittausperiaate ja tarkka mittauspiste eri tilanteissa, on tässä työssä erikseen selostettuna (luku 8.1.1), sillä TLS-menetelmällä tuotettuun pistepilveen rungot mallintuvat (kuva 4) varsin yksityiskohtaisesti. Tämän seikan johdosta voidaan yksittäisten puiden rinnankorkeusläpimitan mittauksen osalta menetellä hyvin yhdenmukaisin periaattein, kuin kentälläkin meneteltäisiin.

6.5 Latvuston korkeusmalli

Latvuston korkeusmallin (CHM, Canopy Height Model) muodostamiseen tarvitaan kahta ALS-menetelmällä muodostettua pintamallia. Latvuston pintamalli (DSM) muodostuu laserkeilaimen lähettämien ensimmäisten paluukaikujen perusteella, ja digitaalinen maastomalli (DTM/DEM) pyritään muodostamaan laserkeilaimen viimeisten kaikujen perusteella. Latvuston korkeusmalli (CHM) saadaan vähentämällä DTM latvuston pintamallista (DSM) (1). (Vosselman & Maas 2010, 217.)

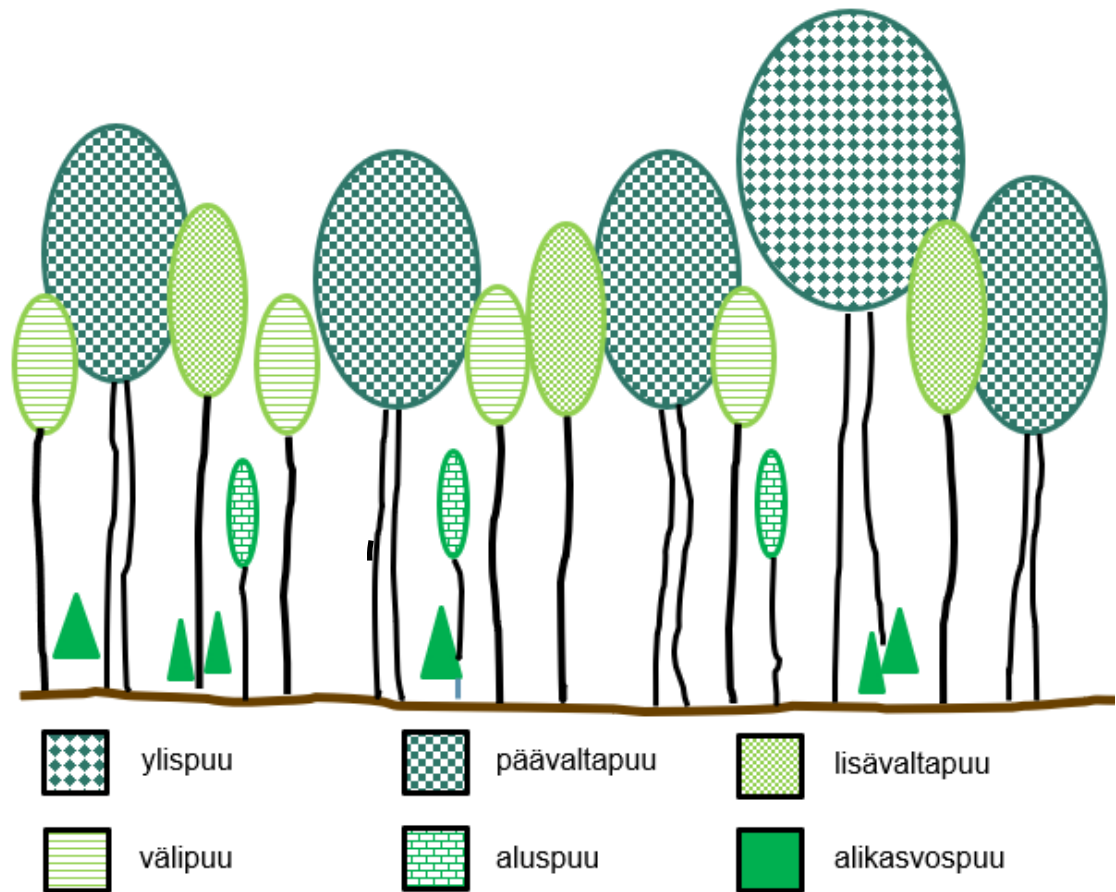
$$CHM = DSM - DEM \quad (1)$$

Useilla tekijöillä, kuten metsikön rakenteella (yksi-/monijaksoinen), tilajärjestyksellä, latvuston tiheydellä ja aukkoisuudella on vaikutusta tarkan DTM-mallin muodostamisessa.

6.6 Visuaalinen kuvatulkinta

Visuaalinen kuvatulkinta on kohteen tunnistamista ja sen ominaisuuksien arviointia kuvalta, kun tulkitsijana on ihminen (Pukkala 1988, 126; Auvinen 1997, 92–94). Osaltaan tämä työ vaati paljon visuaalista kuvatulkintaa, jonka tarkoituksena

oli vähentää ja/tai heikentää automaattisen kuvatulkinnan, eli algoritmien, tuottamaa mahdollista virhettä. Kuvatulkinnassa voidaan eritellä esim. latvuserroksia (kuvio 9). Metsätaloudellisissa toimenpiteissä kuvatulkinta voidaan jakaa kolmeen luokkaan; rajaamiseen, luokitteluun ja tunnusten arvioimiseen.



KUVIO 9. Latvuserrokset (Kangas ym. 2011, 27, muokattu)

7 PUUSTOTUNNUKSET, BIOMASSA JA BIOMASSAMALLIT

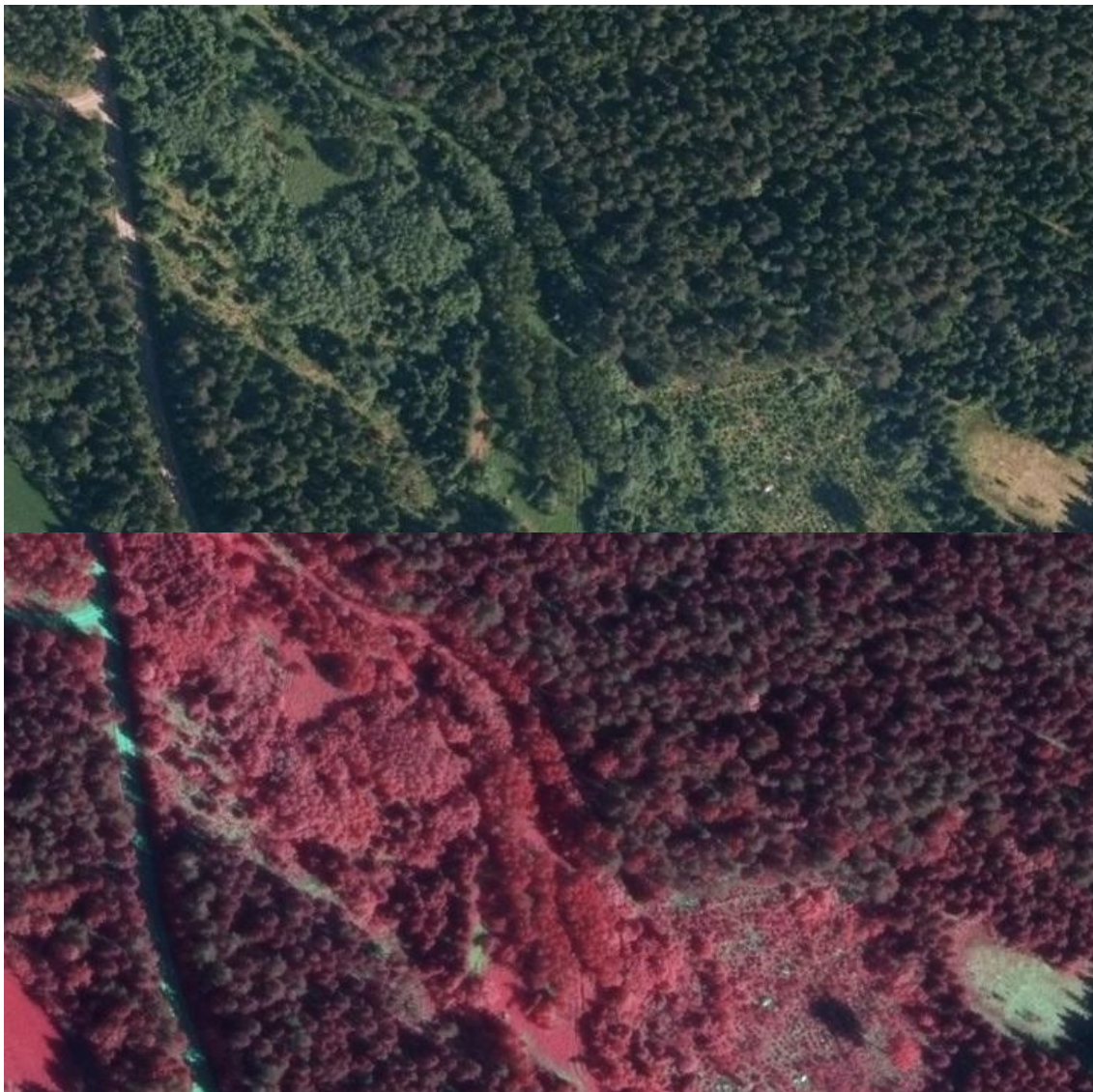
7.1 Puustotunnukset ja niiden tulkinta

Puu on jaettavissa useampaan erilaiseen osaan toiminnasta tai käyttötarkoituksesta riippuen. Metsänarvioimistieteessä puu jaetaan usein runkoon, kanton, juuristoon, oksistoon sekä lehtiin ja neulasiin (Kangas ym. 2011, 25). Latvus muodostuu lehdistä tai neulasista sekä oksista. Itse puuaine jaetaan yleisesti manto-puuhun ja sydänpuuhun. Tämän opinnäytetyön kannalta olennaisimmat tunnuksset ovat puun pituus (h) ja rinnankorkeusläpimitta ($d_{1.3}$), jotka ovat puusta sellaisenaan mitattavia tunnuksia, eli nk. alkuperäisiä tunnuksia. Biomassa taas on johdettava tunnus, jonka johtamiseen tarvitaan monesti vähintään puun pituutta ja rinnankorkeusläpimittaa.

Passiivisessa kaukokartoituksessa, kuten ilmakuvauksessa, tietoa siirtyy sähkömagneettisen säteilyn välityksellä. Kohteesta saatu tieto riippuu kohteen lähettämästä tai heijastamasta sähkömagneettisesta säteilystä. Kohteet heijastavat eri aallonpituusalueita eri tavalla, ja siitä muodostuu ominaissäteily. Kasvillisuuden ominaissäteilyyn vaikuttaa erityisesti lehden pigmentit, lehden solukon rakenne ja veden määrä lehdessä. Näiden heijastussuhteeseen vaikuttavien tekijöiden avulla tarkastellaan säteilyn aallonpituuksia, jolloin voidaan määrittää metsikön puulajisuhteita kasvuston osien perusteella. (Pukkala 1988, 18–19.)

Hyvin ilmakehää läpäiseviä aallonpituusalueita kutsutaan ilmakehän ikkunoiksi. Yleisimmin käytettyjä ilmakehän ikkunoita ovat näkyvän valon ja lähi-infran ikkunat (Kangas ym. 2011, 131). Näkyvän valon (sininen, vihreä ja punainen) alueella erot ominaissäteilyssä esittäytyvät kohteen erilaisina väreinä, jolloin kasvillisuuden tulkitseminen onnistuu vihreän eri sävyinä. Lähi-infran ilmakehän ikkunaan kuuluvat näkyvän valon ilmakehän ikkunasta poiketen vihreä, punainen ja infra-puna (ihmissilmälle näkymätön=VNIR). Merkittävin ero siis syntyy näiden kahden eri aallonpituusalueen tuottamissa väreissä. Havu- ja lehtimetsän ominaissäteily on näkyvän valon alueella suunnilleen samanlaista, mutta lehtimetsä säteilee huomattavasti enemmän lähi-infraa kuin havumetsä. Keskeisessä roolissa ovat

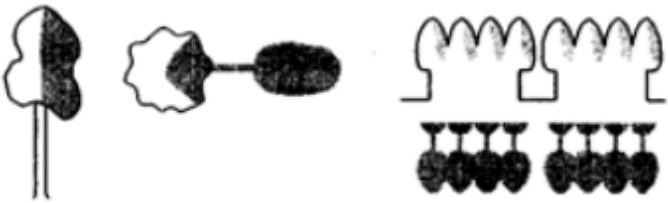


lehtien klorofyllit (lehtivihreä), jotka imevät punaista ja sinistä valoa sekä heijastavat vihreää ja infrapunaa. (Pukkala 1988, 18–19; Auvinen 1997, 64–69.) Näin ollen puulajien erottaminen vääräväriseltä lähi-infrakuvalta on huomattavasti helpompaa (kuva 6).



KUVA 6. Kaksi toisistaan eroavaa ortoilmakuvaa: tosivärikuva (ylempi) ja väärävärikuva (alempi) samasta kohteesta. (Paikkatietoikkuna n.d.)

Ilmakuvilta voidaan tulkita puulajeja ja puuston kokoa ja tiheyttä puulajikohtaisilla tulkinta-avaimilla (taulukko 4). Kohteen havaitsemiseen ja tunnistamiseen käytetään kuvaelementtejä, joita ovat mm. seuraavat: värisävy, varjot, suhteellinen koko, muoto, kuvioitus (esim. suon jänteet), rakenne (esim. metsikön harvuus), korkeussuhteet, toiminnallinen yhteys (ympäristö) ja ajallinen yhteys (kuvausajankohta).

TAULUKKO 4. Puulajien tulkinta-avaimia (Auvinen 1997, 100–101, muokattu)

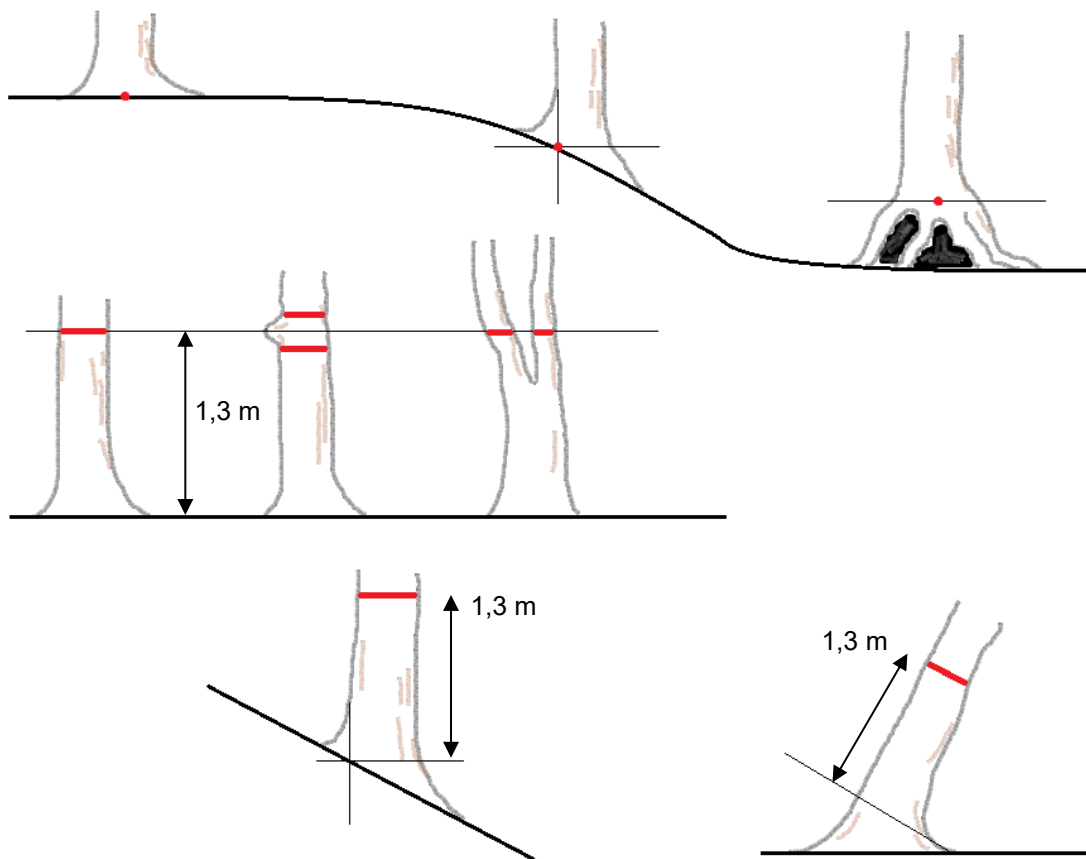
<p>MÄNTY (valopuu)</p> <ul style="list-style-type: none"> • säännöllisen pyöreä • väritys viherruskea (IR*) • pyöreä & tylppälätvainen 	
<p>KUUSI (varjopuu)</p> <ul style="list-style-type: none"> • säteittäisen pyöreä • väritys sinipunainen (IR*) • piikikäs latvusto • mäntyä tummempi 	
<p>KOIVU</p> <ul style="list-style-type: none"> • epäsymmetrinen • väritys purppuranpunainen-punainen (IR*) • heittovarjo alempana kuin männyllä 	
*Väärävärikuvulta	

7.1.1 Rinnankorkeusläpimitta (d_{1.3})

Rinnankorkeusläpimitta (DBH, Diameter at Breast Height) tarkoittaa puun läpimittaa 1,3 m korkeudelta mitattuna. Tutkimuksissa menettelytapana on usein läpimitan mittaaminen kahdesta toisiaan vasten kohtisuoraan olevasta suunnasta, koska puu ei koskaan ole täysin pyöreä.

Puun rinnankorkeuden mittaaminen aloitetaan määrittämällä puun syntypiste, eli piste, josta puun katsotaan aloittaneen kasvunsa (kuvio 10). Tämän jälkeen määritetään varsinainen mittauspiste 1,3 m kohdalta. Syntypiste on määritettävä, sillä kyseessä ei aina ole tasainen maan pinta, vaan puu voi kasvaa jyrkässä rinteessä

tai vaikka kiven päällä. Mikäli mittauskohdassa esiintyy oksa, pahka tai muu luotettavaa mittaustulosta häiritsevä puun ominaisuus, tulee rinnankorkeuslähimitta mitata välittömästi tällaisen kohdan vaikutusalueen ala- tai yläpuolelta tai molempien keskiarvona. Haaroittuneet puut luetaan kahdeksi puuksi, jos haara sijoittuu 1,3 metrin alapuolella.



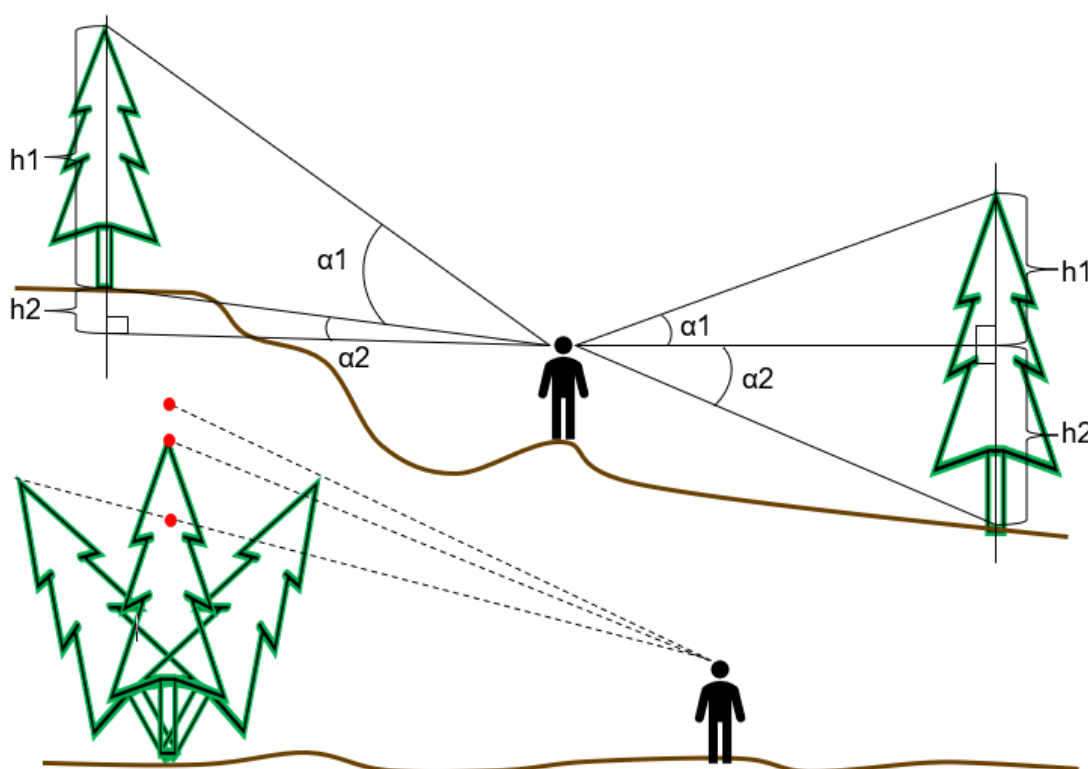
KUVIO 10. Yksittäisen puun syntypisteen, sekä rinnankorkeuden määrittäminen. (Kangas 2011, 34, muokattu)

Rinnankorkeuslähimittaa mitattaessa tulee kiinnittää myös huomiota mittavälineiden välisiin eroihin. Kaulaimella tai mittasaksilla tulisi mitata nk. ristimitta ja käyttää tulosten keskiarvoa, mikäli puun runko on esim. soikea. Ristimitalla saadaan vähennettyä muotovioista aiheutuvaa virhettä lähimittan osalta. Oikein käytettynä Talmeter eliminoi muotovioista aiheutuvaa mittavirhettä suhteellisen hyvin. Talmeter kierretään rinnankorkeudelta puun rungon ympäri, varmistaen, että mittanauha kulkee tiukasti vaakasuoraan rungon ympäri, eikä sen kohdalla ole mittaustulosta vääristäviä tekijöitä, kuten oksakyyhmyjä. Koska perinteisin maasto-

mittausvälinein toteutetut mittaukset ovat subjektiivisia, sisältyy niihin aina virhettä. Tämän virheen hajonnan on todettu läpimitan osalta olevan n. 0,5 cm:n luokkaa (Kangas ym. 2011, 35), kun käytetään millimetriluokan mittasaksia.

7.1.2 Puun pituus (h)

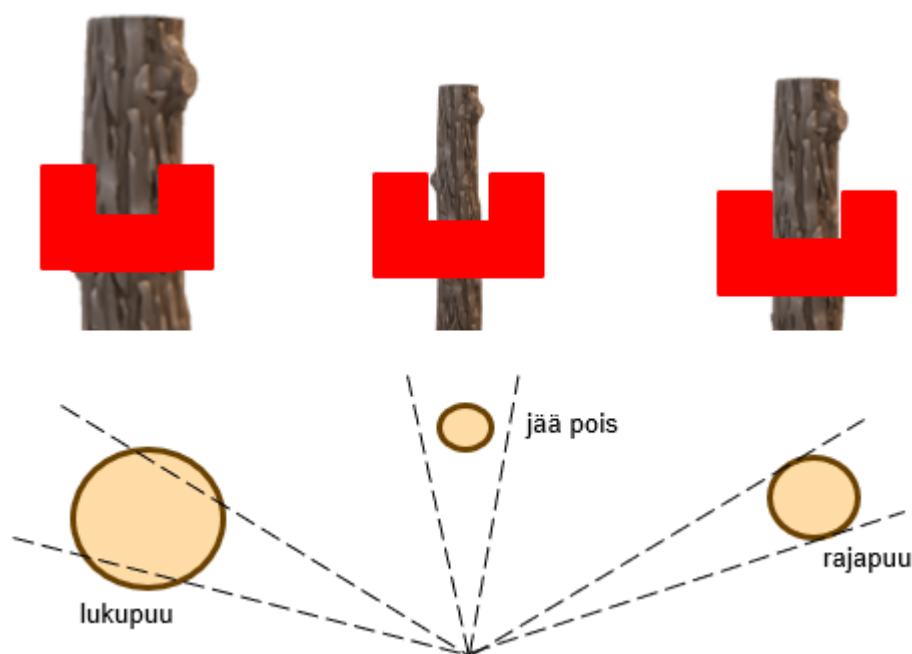
Pituuden mittaus perustuu mittaajan etäisyyteen puusta, eli tarkemmin tähtäysetäisyyteen ja astekulmiin (Kangas ym. 2011, 36). Matemaattisesti ilmaistuna kyse on trigonometrisestä funktiosta, jossa puun pituuden laskeminen perustuu kulmien tangenteihin (kuvio 11), ja sitä kautta saataviin puun osakorkeuksiin. Kulmalukemat saadaan esim. hypsometrin asteikolta suoraan metreinä. Mikäli puun tyvi on katselukulmaa alempana, ilmoittaa lukemien summa puun pituuden, ja jos puun tyvi on katselukulmaa ylempänä, puun pituus on lukemien erotus. Suunto hypsometrillä pituuden mittavirheiden hajonta on tyypillisesti n. 0,5–0,7 m, kun puun pituus on n. 20 m (Kangas ym. 2011, 37). Puun pituuden määrittäminen laserkeilauksella on lähtökohtaisesti tarkempaa kuin perinteisillä metsänmittausmenetelmillä (Hyyppä ym. 2009, 362).



KUVIO 11. Suunto Hypsometrin mittausperiaate ja kallistuneiden puiden aiheuttama mittausvirhe

7.1.3 Puuston pohjapinta-ala (ppa) & relaskooppikoeala

Pohjapinta-alalla tarkoitetaan puuston rinnankorkeudelta mitattujen poikkileikkauspinta-alojen summaa neliömetreinä hehtaaria kohden (Kaarna 1984, 315). Puuston pohjapinta-alan mittaaminen (kuvio 12) tapahtuu perinteisesti relaskooppilla. Relaskooppikoeala on esimerkki muuttuva-/vaihtuvapinta-alaisesta koealasta, jossa jokaista läpimittaa vastaa oma säde. Muuttuva-alainen koeala on koeala, jolla eri kokoiset puut mitataan eri suuruiselta alalta (Ärölä 2018, 281–282). Jokainen relaskooppikoealalle osuva puu edustaa yhtä suurta pohjapinta-alaa tiettyä pinta-alaa kohden.



KUVIO 12. Relaskooppimittauksen periaate. Relaskooppi kohdistetaan rinnankorkeudelle. Rajapuista joka toinen luetaan mukaan.

7.2 Kasvillisuuden biomassa

Biomassa – Elävien organismien kokonaispaino, ml. kasvit ja eläimet, annetulla pinta-alalla; ilmaistaan usein kg/ha, paunaa/ekkeri, g/m², jne. Useimmissa ekologisissa tutkimuksissa, kuten myös tämän opinnäytetyön osalta, biomassa ymmärretään kasvillisuuden ominaisuutena, joka viittaa kasviaineksen painoon annetun pinta-alan sisällä. Toinen yleisesti käytetty termi biomassalle on tuotanto,

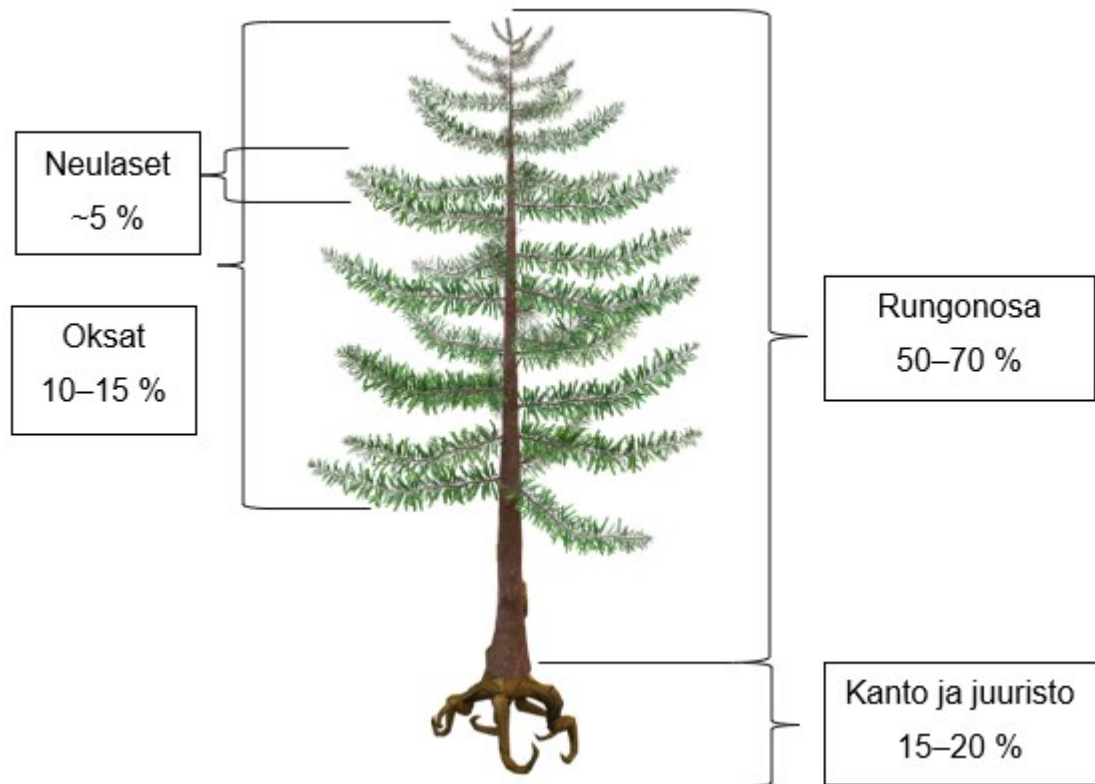
joka viittaa kasvillisuuden tuotokseen pinta-alalla. Alueen biomassa voidaan arvioida lajeittain (esim. jokaisen kasvilajityypin paino), tai biomassa voidaan arvioida ryhmittäisten kasvumallien perusteella (puut, ruoho, ruohovartiset kasvit tai pensaat), kasvin elinkaaren (yksivuotinen tai monivuotinen), tai puumaisuuden asteen (ruohomainen tai puuvartinen) mukaan. (Spellman 2012, 424)

7.2.1 Biomassa (B) puustotunnuksena

Puujoukkoja voidaan rajata usealla eri tavalla. Rajaamisen perustana käytetään perinteisesti kuitenkin puista ja puustosta mitattuja ja saatuja tunnuksia. Useimmat puustotunnukset ovat suhteasteikkolaisia muuttujia, ja ilmaistaan yleensä hehtaarikohtaisina. Tyypillisiä summatunnuksia ovat esim. runkoluku, pohjapinta-ala, tilavuus, tilavuuskasvu ja biomassa.

Biomassa (B) on puujoukon tai puun runkopuun, oksien, lehvästön ja juurien massojen summa. Se voidaan ilmaista esim. kuiva- tai tuoremassana, t/ha. Biomassaa käytetään puuston määrän mittaamiseen, ja useimmiten rajoitutaan maanpäälliseen biomassaan. (Kangas ym. 2011, 69.) Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä valtaosa puun biomassasta sijaitsee rungossa. Tutkimuksissaan Kankare ym. (2013a, 66) selvittivät männyn maan yläpuolisen biomassan jakaantuvan seuraavasti eri ositteisiin: runko (83.50 %), kuori (5.28 %), kuolleet oksat (2.08 %) ja elävät oksat (9.14 %).

Ärölä (2018, 259) mukaan havupuiden absoluuttinen kokonaisbiomassa jakautuu eri ositteisiin terveellä puulla seuraavasti: runko 50–70 %, oksat 10–15 %, neulaset n. 5 % sekä juuristo ja kanto 15–20 % (kuvio 13). Juuriston ja kannon osuus on suurin piirtein samanlainen eri kokoisilla puilla, mutta puun varttuessa rungon osuus suurenee ja lehtien tai neulasten osuus pienenee.



KUVIO 13. Kokonaisbiomassan jakautuminen havupuilla

7.2.2 Metsäbiomassan määrittäminen ALS-aineistosta

Puustobiomassan estimointitarkkuus ilmalaserkeilausaineiston pohjalta on tarkempaa kuin esimerkiksi runkotilavuuden arviot. Biomassaa arvioitaessa suhteellinen keskivirhe (RMSE, Root Mean Square Error, keskineliövirheen neliöjuuri) on noin $\frac{1}{4}$, kun taas runkotilavuuden osalta RMSE on lähemmäs kolmasosa (Tuominen & Haapanen 2014, 144). Väite on loogisesti perusteltavissa, sillä useimmat laserpulssien paluukaiut saadaan latvustosta (kuvio 5), siis neulasista, lehdistä ja oksista, eikä niinkään rungosta, ja latvuksen piirteet (koko, tiheys) selittävät paremmin biomassan määrää, kuin tilavuutta.

Tutkimuksissaan Tuominen ja Haapanen (2014, 143) käyttivät Repolan (2008, 605–624, 2009, 625–647) laatimia puulajikohtaisia biomassamalleja. Tuloksista havaittiin, että maanpäällisen biomassan määrä korreloi hyvin laserkeilausaineistosta irrotettavien piirteiden kanssa. Voidaan mielestäni perustellusti olettaa, että

MML:n entistä tiheämmän (5 p/m^2) laserkeilausaineiston pohjalta tehdyt biomassaestimaatit ovat RMSE:n osalta moninkertaisesti tarkempia, kuin tämän tutkimuksen aikaisten (2006–2008) aineistojen ($0,6\text{--}0,88 \text{ p/m}^2$).

7.3 Biomassan määrittäminen

Puun biomassa, tilavuus tai tiheys voidaan laskea, mikäli yksi em. tekijöistä tunnetaan. Ne ovat siis toisistaan riippuvaisia suureita (Maltamo & Laukkanen 2001, 103). Kyseisten tunnusten ennustamiseen on luotu useita malleja, sillä niiden tarkka mittaaminen on paljon haastavampaa. Erityisesti biomassan tarkka mittaaminen vaatii puun tai sen osien punnitsemista, eli käytännössä puun kaatamista. Lisäksi kun puu kaadetaan, sen tasapainokosteus muuttuu, etenkin kesäaikaan kaadetuilla lehtipuilla. Kuiva puu on usein lähes puolta kevyempää kuin kaatotuore puu. Suomessa biomassan ennustamista on tutkittu suhteellisen vähän, sillä tilavuuden ennustaminen on monesti luotettavampaa boreaalisella kasvillisuusvyöhykkeellä kasvavilla puilla. Tämä johtuu pitkälti luonnontilaisena kasvavien puidemme latvukseen sijoittuneen biomassan suhteellisen pienestä määrästä. Lisäksi biomassan määrä vaihtelee alueittain ja metsiköittäin huomattavasti suuremmin kuin tilavuus (Maltamo & Laukkanen 2001, 103).

Metsätaloudessa biomassamalleja on perinteisesti käytetty esim. hiilitaseen analysoinnissa sekä hakkuutähteiden hyödyntämiseen liittyvissä tutkimuksissa. Mallien avulla voidaan ennustaa puun eri osien biomassaa (kg). Mallien tärkeimpinä selittäjinä toimivat rinnankorkeusläpimitta ($d_{1.3}$) senttimetreinä ja pituus (h) metreinä. Suomessa biomassamalleja ovat laatineet mm. Mälkönen (1974), Hakkila (1979), Finér (1989), Korhonen ja Maltamo (1990) sekä Repola (2008, 2009). Ruotsissa taas on Marklund (1988) laatinut valtakunnalliset puulajikohtaiset biomassayhtälöt. (Maltamo & Laukkanen 2001, 103; Kangas ym. 2011, 54.) Repolan laatimat mallit edustavat tämänhetkistä huipputasoa pohjoisen havumetsävyöhykkeen puulajikohtaisten biomassamallien osalta Suomessa.

Biomassan määrää ennustetaan monesti puulajikohtaisesti, vaikka määrää voidaan ennustaa myös sitä suuremmille tai pienemmille tasoille, kuten suuralue-,

metsikkö-, oksa- tai lehvästötasolle. Tutkimuskirjallisuudessa esiintyvät biomassamallit ovat usein nk. allometrisiä malleja. Allometriset mallit perustuvat tilastolliseen muotoanalyysiin, jossa vaikeammin mitattavia tunnuksia, kuten biomassaa, pyritään selittämään helpommin mitattavien tunnusten, kuten rinnankorkeusläpimitan ($d_{1.3}$) tai pituuden (h) avulla. Yksilön tunnusten väliset suhteet määräytyvät sekä geneettisten tekijöiden, että ympäristön kasvuolosuhteiden perusteella. Eri tunnusten välisissä suhteissa vallitsee siis säännönmukaisuuksia, joita käytetään allometriassa hyväksi (Kangas *ym.* 2011, 44). Peruseriaate on seuraavanlainen: mittasuhteet esim. puun korkeuden ja läpimitan, latvuksen korkeuden ja läpimitan sekä biomassan ja läpimitan välillä noudattavat sääntöjä, jotka ovat kaikille puille samat, kunhan ne kasvavat samoissa olosuhteissa. Allometrisen yhtälön on siis kaava, joka kvantitatiivisesti virallistaa tämän suhteen. (Picard, Saint-André & Henry 2012, 23.)

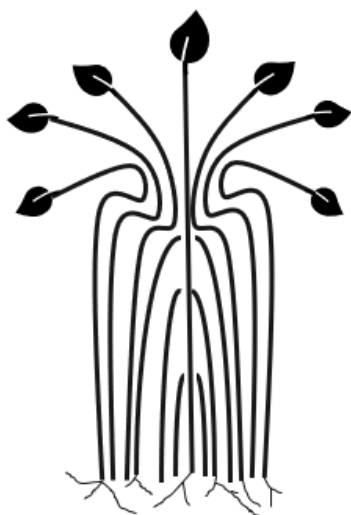
Ohessa on esitetty yksinkertainen allometrisen malli (2) biomassan määrittämiseksi, jossa w on puun biomassa, d rinnankorkeusläpimita ja a ja b mallin parametrejä. Usein malleissa on läpimitan lisäksi muina selittäjinä pituus tai latvusta kuvaavia muuttujia (latvuksen koko, tiheys tai muoto). Mallien parametrit (a , b) voivat vaihdella metsiköittäin, jolloin niitä voidaan kuvata muiden tunnusten, kuten pituuden tai tiheyden funktiona. (Maltamo & Laukkanen 2001, 103)

$$\hat{w} = ad^b \quad (2)$$

On olemassa putkiteoria (Shinozaki, Yoda, Hozumi, & Kira, 1964, 97–105), jonka mukaan latvuksen lehtipinta-ala ja rungon poikkileikkauspinta-ala elävän latvuksen alarajalla ovat suhteessa toisiinsa. Putkiteoria on esimerkki allometrisestä mallista (2), jossa x -määrä vedenkuljetussolukkoa pystyy toimittamaan vettä enintään x -määrälle haihduttavia lehtiä. Riippuvuussuhde syntyy siis lehtien massan ja putkisolukoiden poikkileikkauspinta-alan välille (Kangas *ym.* 2011, 44). Putkimallissa (3) rungon mantopuun pohjapinta-ala (A_s) on verrannollinen mitauskohdan yläpuolella olevaan lehti- tai neulasmassaan (W_f):

$$\eta_s A_s = W_f \quad (3)$$

Puun vanhetessa sen rungon sisimmät solukot kuolevat muodostaen sydänpuuta. Mantopuu taas on elävää solukkoa, jota kutsutaan myös pintapuuksi. Putkiteorian mukaan latvuksen lehtibiomassan optimaalisin selittäjä olisikin puun läpimitan sijasta mantopuun poikkileikkauspinta-ala latvusrajalla. Siispä tiettyä lehtimassaa vastaa ”putki”, jonka poikkileikkausala on vakio ja joka yhdistää lehdet puun tyvelle (kuvio 14). Mantopuun osuuden selvittäminen latvusrajalla on kuitenkin poikkeuksellisen vaikeaa. Mainittavan arvoista kuitenkin on, että mantopuutunnukset voivat lisätä eri mallien selityskykyä puun biomassaositteiden kohdalla. Yleensä ennustettaessa latvuksen ominaisuuksia käytetään hyväksi helpommin mitattavissa olevia puuyksilön tunnuksia, kuten rinnankorkeusläpimittaa, vaikka putkiteorian mukaisesti mantopuutunnuksilla (ja erityisesti latvusrajalta mitattuna) päästäänkin parempiin tuloksiin. (Maltamo & Laukkanen 2001, 128–129; Kangas ym. 2011, 55.)



KUVIO 14. Putkimallin (pipe model) periaate

Biomassaositteiden ennustamiseen käytettävillä malleilla on yksi yleinen ongelma; additiivisuus. On siis kyettävä takaamaan, että eri ositteiden, kuten rungon ja kuoren tai oksien ja neulasten ennusteiden summan tulisi olla yhtä suuri kuin niiden kokonaisbiomassan ennuste.

Tutkimuksissaan Repola (2008, 2009) laati koivuille (*Betula pendula* Roth & *Betula pubescens* Ehrh), männulle (*Pinus sylvestris*) sekä kuuselle (*Picea abies* [L.] Karst) biomassan ennustemallit, joilla voidaan estimoida puun eri ositteiden tai koko puun biomassaa. Yksinkertaisimmassa mallissa selittäjinä ovat puulajin

lisäksi puun pituus sekä rinnankorkeusläpimitta. Useamman muuttujan mallit perustuvat edellisten lisäksi muuttujiin, kuten elävän latvuksen pituuteen, puun ikään rinnankorkeudelta mitattuna, kuoren paksuuteen sekä säteittäiseen kasvuun viimeisen viiden vuoden aikana. Repolan malleja on käytetty useissa nykyisissä tieteellisissä tutkimuksissa, joka osoittaa mallien edustavan tämänhetkistä huipputasoa. Mallien rakentuessa taustaoletuksena oli, että biomassasuhteet eivät ole riippumattomia ja ne vaihtelevat puusta ja metsiköstä toiseen. Malleja laadittaessa sovellettiin menetelmää, jossa puun eri osamallien (runko, kuori...) parametrit estimoitiin yhtäaikaisesti (monivastemalli). Täten kyettiin hyödyntämään parametrien estimoinnissa osamallien välisiä korrelaatioita ja tuottamaan informaatiota puun eri osien välisistä korrelaatioista. Monivastemallien etuna on niiden joustavuus, sillä yhdenkin mitatun ositteiden biomassatiedolla voidaan kalibroida biomassaennuste puun kaikille ositteille uudessa metsikössä. Monivastemalli mahdollistaa myös osamallien kovarianssien avulla ennustevirheiden laskeamisen mille tahansa puun ositteelle tai niiden yhdistelmälle. (Repola 2010, 91–92)

Biomassamallien ositteiden summaamisen yleinen ongelma on niiden additiivinen luonne, eikä osamallien summasta saada samaa tulosta kuin koko puun biomassaa ennustavasta mallista. Repolan laatimien biomassamallien monivastemallit antavat kuitenkin parempia tuloksia (vrt. riippumattomina estimoidut mallit) myös additiivisuuden osalta. Mallit on tarkoitettu käytettäväksi Suomessa, ja ne antavat loogisia tuloksia muihin Pohjoismaissa tehtyihin tutkimuksiin verrattuna. Yleisrajoitteena malleille on kuitenkin niiden sidonnaisuus kivennäismailla kasvaavaan puustoon, eikä mallien luotettavuudesta turvemailla tai pohjoisimmassa osassa Suomea ole kattavasti tietoa. Yleisesti ottaen biomassamallit soveltuvat kuitenkin suureen osaan Suomea, ja antavat vähintäänkin loogisia tuloksia järeämmistäkin ($d_{1.3} > 42$ cm) puista. Toinen yleinen seikka mallien soveltamiselle on, että käytettäisiin pituuden ja rinnankorkeusläpimitan lisäksi muita inventoituja muuttujia. Aineiston edustavuuden harha pienenee, mitä paremmin eri tekijöiden vaikutus on otettu huomioon biomassan tai puun eri ositteiden välisissä biomassasuhteissa.

8 AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄ

8.1 Tutkimusaineiston hankinta

Tutkimusaineistosta maalaserkeilausaineisto (TLS) on itse tuotettua. Ilmalaserkeilausaineisto (ALS) on Maanmittauslaitoksen tuottamaa. TLS-aineisto on pistetiheydeltään yli tuhatkertainen ALS-aineistoon verrattuna. Maalaserkeilaimella tuotetun pistepilven pistetiheys on n. 25 000 p/m², kun taas MML:n uudessa laserkeilausaineistossa pistetiheys on 5 p/m². Koska TLS-aineiston keruu on merkittävä osa tämän opinnäytetyön perustutkimusta, on siitä selostettuna tulevissa luvuissa erikseen.

Maalaserkeilaimella hankitun laserkeilausaineiston ja siitä mallinnettujen puiden lukumäärä oli 116 puuyksilöä, joista 7 yksilöä jätettiin työn myöhemmissä vaiheissa otosten ulkopuolelle. Tarkastelun ulkopuolelle jätetyistä puista 6 kpl oli keloutuneita tai latvasta kuolleita puita. Yksi puista oli pensastunut lehtipuu. Viiallisten tai sairaiden puiden ominaispiirteiden ei uskottu käyttäytyvän hyvin alometrinen mallien kanssa. Lisäksi rinnankorkeusläpimitan mallintaminen latvuksen läpimitan avulla olisi rajusti aliarvioinut kuolleiden puiden rinnankorkeusläpimitan.

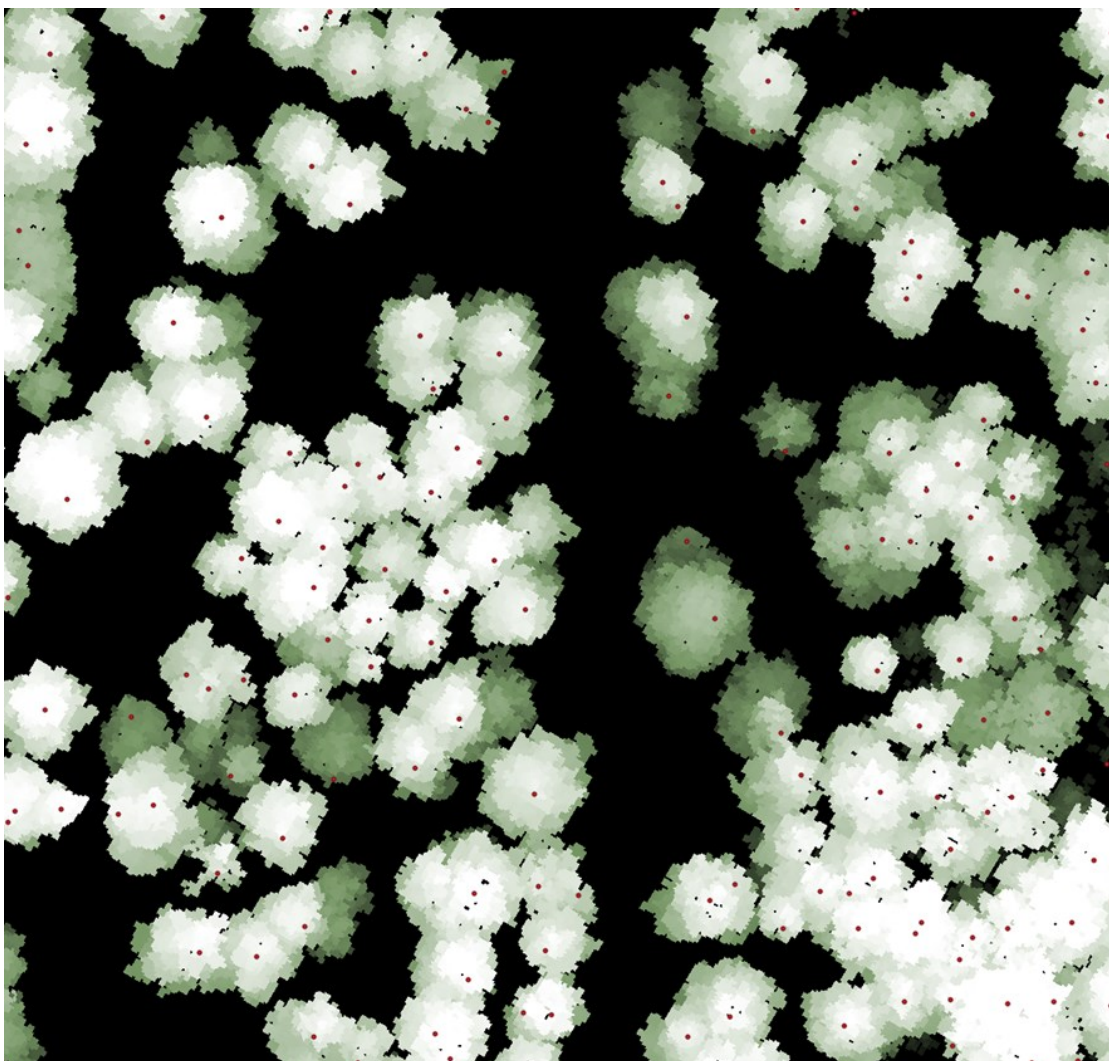
TLS aineiston lopullisen otoksen koko oli 109 puuyksilöä, joista 93 kpl (85,3 %) oli mäntyjä ja 16 kpl (14,7 %) koivuja. MML:n ilmalaserkeilatun laserkeilausaineiston koko määräytyi osittain samoin perustein, kuin TLS menetelmällä tuotetulla aineistolla, mutta olennaisemmin aineiston kokoon vaikutti se, ettei kaikkia alikasvospuita voitu havaita ALS pistepilvestä. Lopullisen otoksen koko käsitti 103 puuta, joista 92 kpl (89,3 %) oli mäntyjä ja 11 kpl (10,7 %) koivuja. ALS aineiston otoskoko oli siis 5,5 % pienempi kuin TLS aineiston otoskoko. Koska kohdemetsikön puita ei kaadettu ja puustotunnuksia ei päästy täsmällisesti määrittämään, pidetään TLS aineistosta mitattuja ja mallinnettuja tunnuksia vertailuissa nk. absoluuttisena totuutena.

8.2 Kenttätöiden suunnittelu ja valmistavat toimenpiteet

Kenttätöiden ja mittaustapahtuman suunnittelussa hyödynnettiin suunnittelutöiden yleistä kaavaa (liite 3), jonka pohjalta johdettiin mittaustapahtuman kartoitus- taulukko (liite 4). Metsän inventoinnin suunnittelussa pätee sama kaava kuin missä tahansa muussa suunnittelutehtävässä. Infrastruktuurilla on ratkaiseva vaikutus menetelmän suunnittelussa, sillä esim. tiestö määrittelee, kuinka vaivat- tomasti kohteelle päästään, huomioon ottaen mukana kuljetettavien artikkelien määrä (Kangas ym. 2011, 169).

Kenttätöinä toteutetuilla TLS-mittauksilla oli useita tavoitteita. Keskeinen tavoite oli saada tuotettua mahdollisimman tarkkoja pistepilviä useammalta kojease- malta. Lukuisilta kojeasemilta tallennettujen pistepilvien tavoitteena oli muodos- taa mahdollisimman tarkka georeferoitu pistepilvi rekisteröinnin tuloksena. Yhdis- tetyn ja rekisteröidyn pistepilven tehtävänä olisi mallintaa tarkastelumetsikkö tar- kasti puutasolle ja puuyksilön osia myöten. Toisena tavoitteena oli arvioida ja mi- tata kohteelta puustotunnuksia perinteisin maastomittausvälinein, jotta käytettä- villä biomassamalleilla olisi jokin oikean suuntainen referenssitieto.

Metsikkökoeala pyrittiin rajaamaan mahdollisimman homogeeniseksi ja neliö- mäiseksi, jolloin koealan ulkopuolelle jäävän metsikön vaikutus, ns. reunavaiku- tus, kyettiin minimoimaan. Tutkimustehtävissä on usein myös perusteltua pyrkiä jättämään koealan ympärille muutaman metrin levyinen vaippa, jossa metsä on samanlaista kuin koealalla. Siinä missä pienemmän koealan (100–1000 m²) tyyppi on useimmiten ympyräkiekko, ovat tätä suuremmat usein suorakaiteen muotoisia (Kangas ym. 2011, 77–78). Rajaus tapahtuu perinteisesti kulmapris- maa, linjaseipäitä sekä mittanauhaa hyödyntäen. Perinteisestä mallista poiketen rajaus tapahtui kuitenkin bussolin ja mittanauhan avulla. Kulma- ja välipaaluina käytettiin erivärisiä kuitunauhoja. Tämä rajaustyylili oli perusteltua, sillä rajaamisen piti tapahtua nopeasti hiipuvan luonnonvalon takia. Tarkastelun kohteena oleva metsikkö oli suhteellisen vaivatonta rajata maastoon, sillä metsä oli rakenteeltaan poikkeuksellisen homogeeninen, harva ja tilajärjestykseltään suurelta osin ryh- mittäinen (kuva 7).



KUVA 7. Rasteroitu kuva kohdemetsiköstä. Vaaleammat kohdat ovat puiden latvoja, kun taas tummemmat kohdat alikasvosta.

8.3 Mittalaitteet ja -välineet

Työn ja mittausten kannalta keskeisin mittaväline oli FARO Focus 3D X 330 -maalaserkeilain (liite 1), jolla pistepilvet tuotettiin. Käytettävissä oleva laserkeilain mittaa kupolimaisesti. Vertailupohjan kasvattamiseksi mitattiin 5 kpl referenssi-koealoja perinteisten maastomittausvälineiden (liite 2) avulla. Perinteisiin mittavälineisiin lukeutui relaskooppi, talmeter, metsurinmitta sekä Suunnon hypsometri. Rinnankorkeusläpimitan mittaamiseen valittiin erityisyyistä talmeter, sillä kohteen lähtötietojen (liite 5) perusteella puusto oli poikkeuksellisen järeää, eikä kaulaimen mitta-asteikko olisi välttämättä ollut kaikissa tilanteissa riittävä. Metsurinmitan tulee olla vähintään 15 m pitkä. Tämä siitä syystä, että hypsometri käyttää 15 m ja 20 m etäisyysmitta-asteikkoja. Kohteen valtapuusto oli myös yli 20 m

pitkää, joten myös pidemmän metsurinmitan hyödyntäminen olisi ollut puuston pituusmittauksissa perustellumpaa. Pidempi etäisyys mitattavaan puuhun laskee katselukulmaa ja monesti helpottaa latvan korkeimman kohdan havaitsemista.

8.4 Maalaserkeilaimen tarkkuusasetukset

Aiempien kokemusten perusteella päädyttiin seuraaviin asetuksiin (kuva 8): mittausprofiiliksi valittiin ulkona tapahtuva mittaus ja kupolimainen näkemä. Pistetiheys on n. 25 000 p/m², kun pisteiden välinen etäisyys 10 m päässä kojeaseman origosta on n. 6 mm. Käytännössä pisteiden välinen etäisyys kuitenkin säilyi rekisteröidyissä pistepilvissä huomattavasti lyhyempänä, sillä useammalta kojeasemalta tallennetut pistepilvet täydentävät toinen toisiaan.

Esimerkiksi pistepilven tiheyttä olisi voitu kasvattaa, sekä lisätä kojeen mittausominaisuuksiin digikuvaus. Luonnollisten värien tallentamisella (digikuvaus) ei tämän työn osalta ollut kuitenkaan merkitystä, sillä pistetiheys oli enemmän kuin riittävä puulajitunnistukseen. Ei myöskään haluttu kojeasemien mittausaikojen pitkittyvän tarpeettomien ominaisuuksien tallentumisesta johtuen. Yksittäisen mittaustapahtuman kesto oli n. 5 min.



KUVA 8. FARO-laserkeilaimen asetetut asetukset

8.5 Mittausajankohdan sääolosuhteet

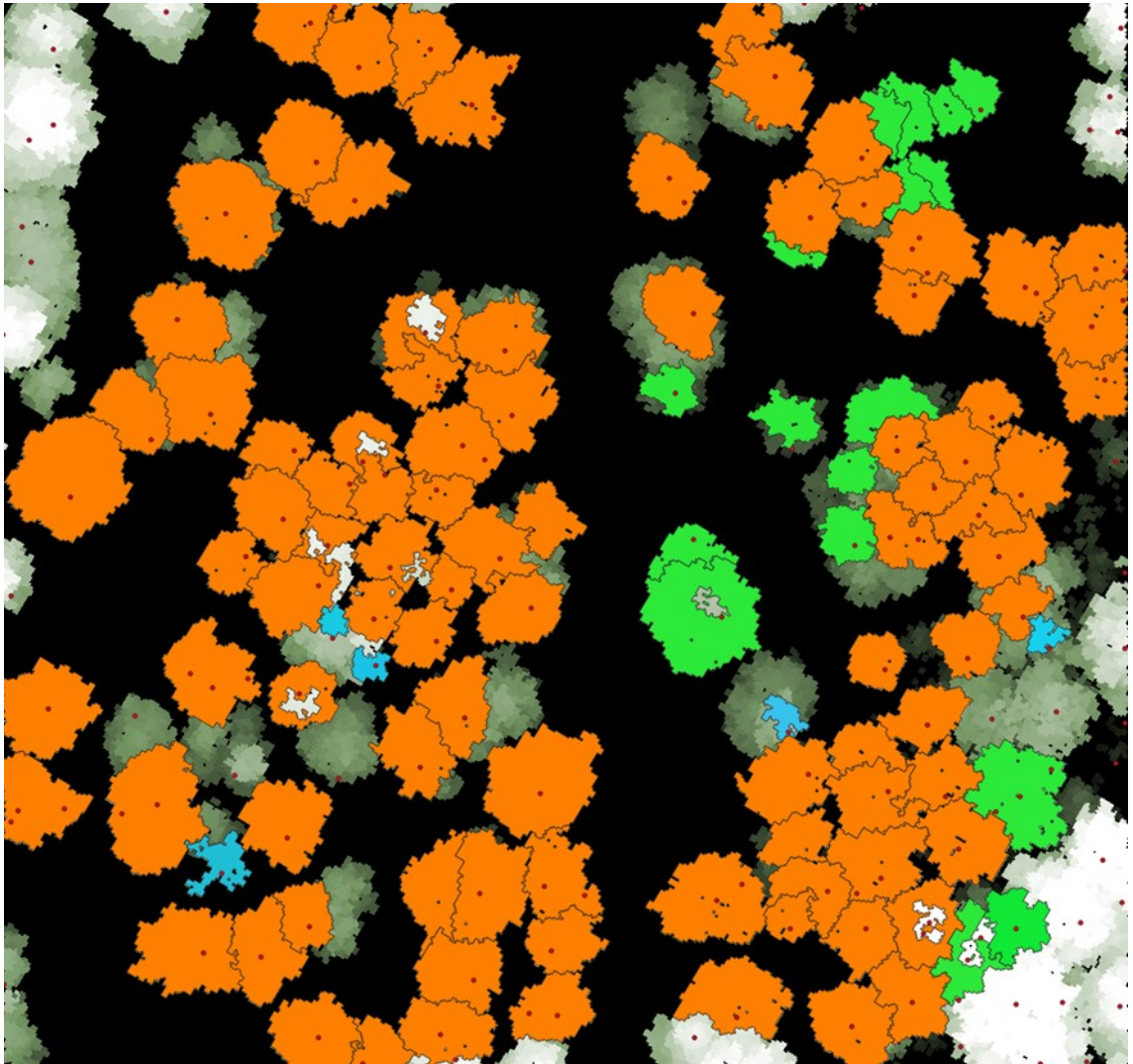
TLS-keilauksen kenttätöet suoritettiin torstaina 17.12.2020. Vallitsevat sääolosuhteet olivat vuodenaika huomioiden yllättävän hyvät. Aurinko nousi n. klo. 9.30 paistaen lähes koko päivän pituuden ajan n. klo. 15.00 saakka. Varsinaisten kenttätöiden aikaan päivän lämpötila pysyi $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ välissä. Tuulen nopeus oli alhainen, noin 1 m/s. Sadetta ei havaittu. Kohdemetsikkö (kuva 9) oli erinomainen mallinnettava.



KUVA 9. Kohdemetsikön läntinen puolisko (klo. 11.26).

8.6 Inventoitava alue

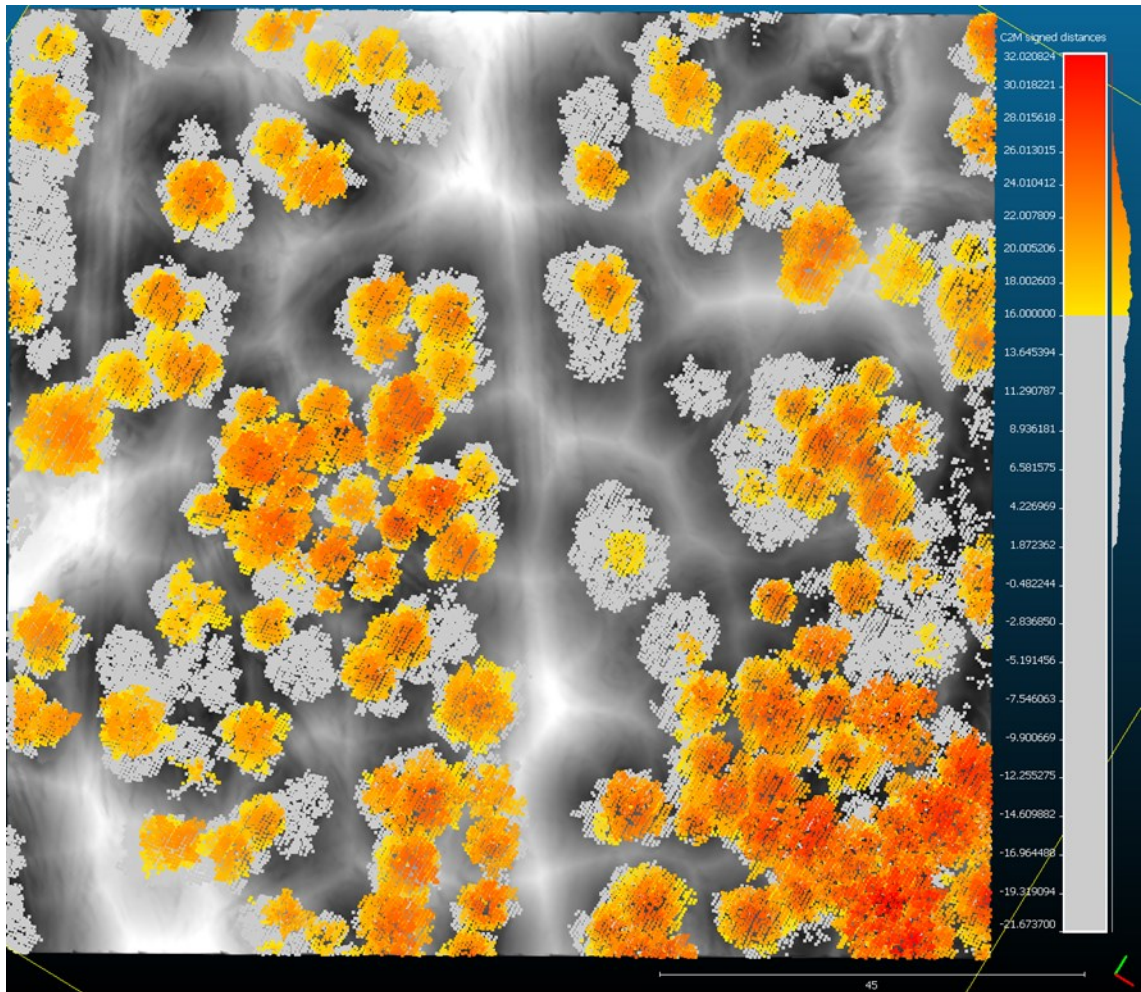
Kohdemetsikkö sijaitsee eteläborealisella ilmastovyöhykkeellä. Alue oli tiedet-
tävästi jäänyt täysin varsinaisten metsätaloudellisten toimenpiteiden ulkopuo-
lulle. Puusto oli mäntyvaltaista (kuva 10), iäkästä ja järeää, eikä kovin laadu-
kasta. Laatuun keskeisimmin vaikuttaneita tekijöitä oli runsaat runko- ja juuristo-
vauriot.



KUVA 10. Erivärisiä polygonisegmenttejä, jotka mallintavat puiden latvoja. Män-
nyt (oranssi), lehtipuut (vihreä), kuolleet puut (turkoosi) ja alikasvos/rajauksen
ulkopuolinen puusto (vihreän eri sävyt).

Kohdemetsikön koko alan puiden tilajärjestystä voisi luonnehtia satunnaisen
ryhmittäiseksi, koska puut olivat sijoittuneet alalle satunnaisiin ryhmiin (kuva
12). Ryhmittäisyyttä korosti maastossa havaittavat leveät urapainaukset, jotka

osaltaan segmentoivat puita ryhmiin. Kuvassa 11 valtapuusto (>16 m) on korostettu digitaalisen korkeusmallin mukaan.



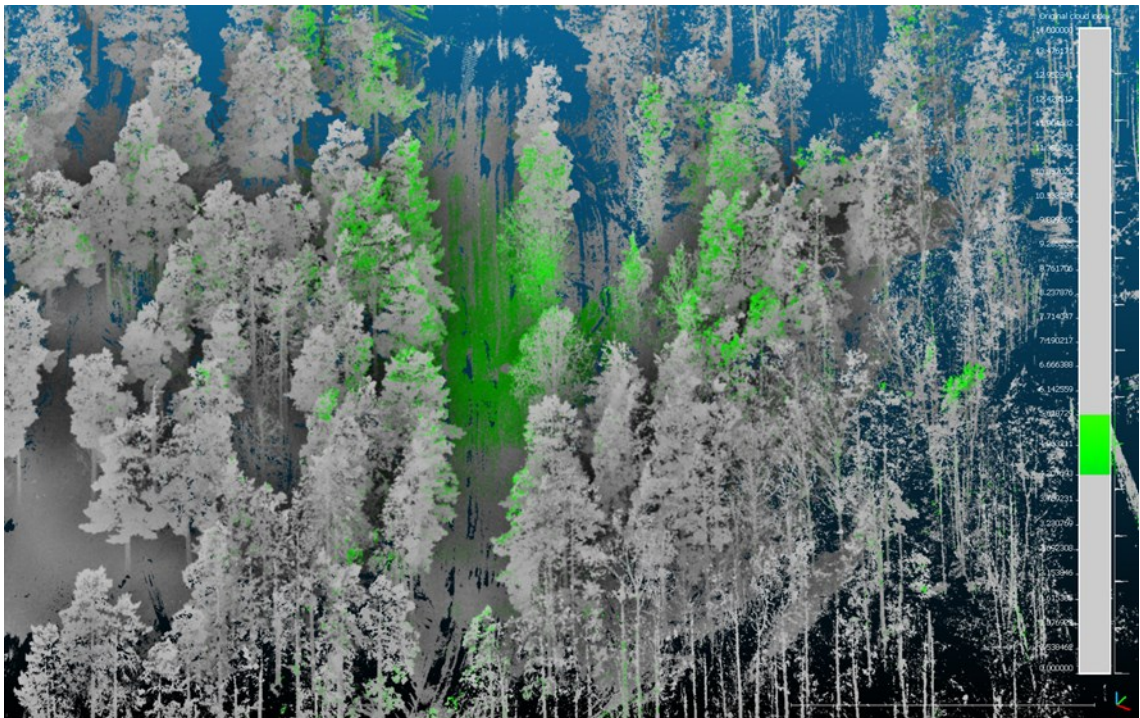
KUVA 11. Havainnollisuuden parantamiseksi kuvassa on yhdistetty 5 p/m² -aineisto, sekä topografiaa noudatteleva mesh-maastomalli.

8.6.1 Kojeasemat

Mittaustapahtuman suunnitteluvaiheessa määritetyt kojeasemien paikat muuttuvat usein osittain tai kokonaan, kun toimitaan metsäisessä ympäristössä. Olettaen tietenkin, ettei tulevalle mittauspaikalla ole käyty, vaan suunnitelmat on laadittu lähtötietojen (esim. avoin metsävaratieto) perusteella. Lopulliset kojeasemien paikat määrittyvät siis usein vasta kentällä. Kojeasemien sijoittelua metsäisessä ympäristössä hankaloittaa ensisijaisesti kojeen optisen tekniikan ja tähysten väliin tulevat esteet, kuten oksat, mutta myös korkeuden vaihtelut. Tähtysten käytöllä pyritään ensisijaisesti helpottamaan georeferointia. Pistepilviohjelma ei

välttämättä kykene tunnistamaan tähysten geometriaa ja tätä kautta hyödyntämään tähyksiä keilaustulosten yhdistämisessä, mikäli tähyksen pintaan ei ole tallentunut riittävästi pisteitä, joiden kulku on estynyt esim. oksien tai alikasvoksen takia. Peitteisyyden lisääntyessä ja näkymän heiketessä myös tähysten lukumäärää on syytä lisätä, jotta jokaiselta kojeasemalta saadaan tunnistettua vähintään 3 kpl tähyksiä. Mikäli halutaan mitata vain yhdeltä kojeasemalta (single-scan), yhteisiä tähyksiä ei periaatteessa tarvita ja kojeasema voidaan sijoittaa kohdemetsikköön mielivaltaisesti. Tähyksiä voidaan silti hyödyntää vain yhdeltä kojeasemalta mitattujen pisteiden georeferoinnissa.

Kojeasemien etäisyyksien keskiarvo saatiin laskemalla jokaisen kojeaseman kahden lähimmän kojeaseman välisen etäisyyden keskiarvo, ja lopuksi laskemalla kaikkien 15 kojeaseman keskimääräisten etäisyyksien keskiarvo. Kojeasemien keskimääräinen etäisyys oli n. 20,7 m. Yhdeltä kojeasemalta tallentuu miljoonia pisteitä, jotka täydentävät yhdessä muilta kojeasemilta tallentuneiden ja rekisteröityjen pisteiden kanssa ympäristöään varsin yksityiskohtaisesti. Yhden kojeaseman pisteet ulottuvat kymmenien, jopa satojen metrien päähän. Kohdemetsikön avarimmilta kohdilta mitatuista kojeasemista pisteet levittyivät ympäristöön laajalle alalle (kuva 12).



KUVA 12. Kuvan kojeasemalle (vihr.) on suodatusten ja muun prosessoinnin jälkeen tallennettuna yhteensä 13 910 743 pistettä.

8.6.2 Referenssikoealat

Metsikön tunnuksia arvioidaan lähtökohtaisesti siitä poimitun otoksen avulla. Otos voi muodostua useammasta koealasta, jotta näytteen edustavuus paranisi. Perinteisin maastomittausvälinein mitatut laserkeilausaineistojen referenssikoealat (relaskoopikoealat) sijoiteltiin kohdemetsikköön puuryhmien sisälle, eikä niinkään tasaisesti koko alalle. Relaskoopikoealojen sijoittelun takia puuston pohjapinta-ala ei vastaa metsikön todellista keskimääräistä pohjapinta-alaa. Sijoittelua puuryhmien sisälle perusteltiin sillä, että pohjapinta-alaa tärkeämpi tunnus oli metsikön puuston mediaanipuiden (puu, jota ohuempia ja paksumpia puita on yhtä paljon) määrittäminen, joiden avulla saataisiin oikeamman suuntainen referenssitieto TLS- ja ALS-aineistoista määritetyn puujoukon perustunnuksille.

Relaskoopikoealoilta (taulukko 5) valittiin lukupuista tarkempia mittauksia varten mediaanipuu. Mediaanipuusta (5 kpl) määritettiin metsikön puuston keskipituus hypsometria käyttäen, sekä keskiläpimitta rinnankorkeudelta talmeterin avulla. Mediaanipuiden perusteella laskettiin puuston keskipituus ja keskiläpimitta. Mediaanipuuta valittaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota sen edustavuuteen kohdemetsikön osalta. Kuolleet, heikkokuntoiset, sairaat tai esim. latvukseltaan poikkeavat puut eivät ole soveltuvia yksilöitä.

TAULUKKO 5. Referenssikoealoilta mitattujen mediaanipuiden tunnuksat.

Koe- alan nro	PPA	h (m)	d_{1,3} (cm)	KPT	KL	m³/ha*	PPL
1	17	21.5	54	VT	04	161	MÄ
2	17	25	50	VT	04	177	MÄ
3	22	22	42	VT	04	208	MÄ
4	24	24.5	38	VT	04	250	MÄ
5	19	23.5	49	VT	04	192	MÄ
ka.	19	23.30	46.60	VT	04	197.60	MÄ

*Taulukon antamasta kuutiomäärästä on tehty 5 % vähennys metsikön epätasaisesta rakenteesta johtuen.

8.7 Tutkimusmenetelmä

Kohdemetsiköstä itse tuotettua TLS-pistepilveä verrattiin Maanmittauslaitoksen tuottamaan ALS-pistepilveen. Kahden aineiston tuloksellinen vertaaminen edellytti kuitenkin tulkintatyötä, jossa kohdemetsikön puut oli rajattava ja luokiteltava yksittäisten puustotunnusten mittaamiseksi tai johtamiseksi pistepilvestä.

Tulkintatyö aloitettiin mitattujen kohteiden, eli puuyksilöiden havaitsemisella ja paikantamisella pistepilvistä. Havaitseminen ja paikallistaminen perustuivat käytännössä kohteiden muotoon ja kokoon. Tunnistamisen tulkintakriteereinä ja tulokinnan apuna käytettiin mm. puulajeille tyypillisiä runkomuotoja, latvuksen muotoa/”pinnan tekstuuria” sekä ilmakuvia (MML:n aineiston osalta). Myös puun sijainnilla ja sitä kautta toiminnallisella yhteydellä voitiin joissain tapauksissa päätellä puulajeja. Esim. muutenkin lehtipuulta näyttävä puu, joka kasvoi ojan välittömässä läheisyydessä, oli todennäköisemmin hieskoivu, kuin mänty. Vielä erityisemmin lehdettömään aikaan tehdyt TLS-mittaukset auttoivat puulajitunnustuksessa.

Kohdemetsikön kaikkien latvuserrosten puut pystyttiin visuaalisella kuvatulkinalla vaivatta tunnistamaan erittäin korkean pulssitiheyden TLS-pistepilvestä. On syytä huomauttaa, että suuret puut ovat helpompia tunnistettavia, sillä niiden runkojen pinta-alalle tallentuu lähtökohtaisesti eniten pisteitä, eikä pistetiheyden harveneminen etäisyyden kasvaessa laske tätä suhdetta yhtä merkittävästi, kuin huomattavasti pienempiläpimittaisilla puilla. Pieniläpimittaisten puiden on myös helpompi jäädä suurempien puiden katveeseen, jolloin esim. niiden rungolle ei kyseiseltä kojeasemalta tallennu välttämättä ainuttakaan pistettä.

Menetelmien absoluuttista tarkkuutta haluttiin tutkia mahdollisimman tarkasti, joten TLS-otosjoukon alkioden lukumäärää jouduttiin rajoittamaan, jotta alkiot vastasivat toisiaan. Eli molemmista laserkeilausaineistoista (ALS & TLS) on valittu ”samat puut”. Näihin puihin viitataan jatkossa ”vastinpuina”. Regressiomalleja laadittaessa on otoskoon oltava riittävä. Yhden selittävän muuttujan malleissa riittää jo 20 alkion otoskoko, kun taas useamman selittävän muuttujan mallien taakse vaaditaan vähintään otsokooltaan 50, mutta mielellään 100 alkioita (Taanila 2020, 1).

Mitatuille tai mallinnetuille puulajikohtaisille puustotunnuksille toteutettiin eri asteisia tilastollisesti kuvaavia analyyseja. Alkiot luokiteltiin ja kvantifioitiin eli aineisto muunnettiin määrälliseen muotoon. TLS- ja ALS-pistepilvistä mitatuille tai johdetuille puulajikohtaisille perustunnuksille (h , $d_{1.3}$) laskettiin Excelissä prosentuaaliset ja suurekohtaiset keskiarvot ja keskihajonnat. Tilastollisesti kuvaavia analyyseja olivat mm. Excelin taulukkolaskentaohjelmien avulla muodostetut pylväsdiagrammit sekä hajonta- ja jäännöskuviot.

Näistä edettiin riippuvuussuhteiden analyyseihin, joissa kausaalisuutta todistettiin varianssianalyysin avulla, kuten kahden muuttujan regressioanalyysillä. Regressiotunnusluvusta laskettiin ensin manuaalisesti kovarianssi ja korrelaatiokerroin (R), jonka jälkeen Excelin apuohjelmista ladattavilla analyysityökaluilla laskettiin selityskerroin (R^2) ja muita tilastollisia tunnuksia (liite 6).

Koska boreaalisen metsävyöhykkeellä kasvavilla suomalaisilla pääpuulajeilla on vahva korrelaatio latvuksen läpimitan ja rinnankorkeusläpimitan kanssa (Hyyppä, Kelle, Lehikoinen, & Inkinen 2001, 973) päädyttiin rinnankorkeusläpimitta mallintamaan latvusten tunnusten pohjalta. Ilmalaserkeilausta ja latvusten tunnuksia käsittelevässä tutkimuskirjallisuudessa esiintyy usein Watershed-algoritmi, joka segmentoi rasterikuvan samanarvoisiin kokonaisuuksiin riippuen yksittäisten solujen paikallisista maksimi- ja minimiarvoista. (Panagiotidis, Abdollahnejad, Surový, & Chiteculo 2017, 2394).

8.8 Ohjelmistot

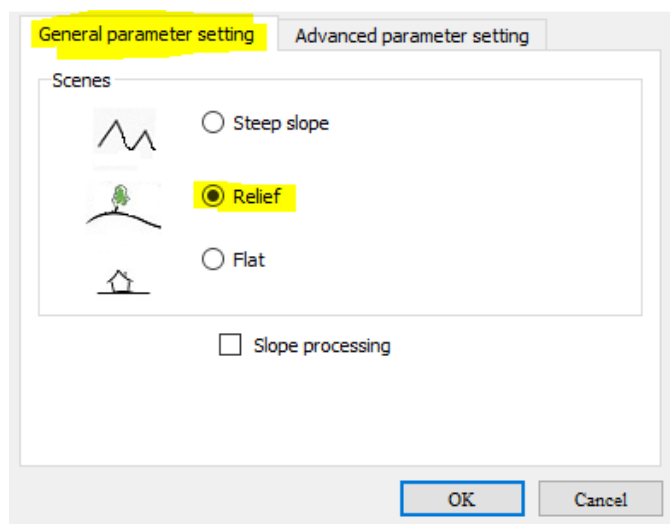
Pistepilvien rekisteröintiin ja georeferointiin käytettiin SCENE- ja SCENE LT (2020.0.6) -ohjelmistoja. Varsinaiseen pistepilvistä mitattavien perustunnusten tulkintaan ja lasketukseen käytettiin CloudCompare (2.12.alpha) -ohjelmistoa. Rasteriaineistoja, joista johdettiin puustotunnuksia, käsiteltiin QGIS (3.10.5) -ohjelmistolla. Työssä tuotettujen miljoonien pisteiden pistepilvien käsittely ja analysointi edellytti tiettyjä järjestelmävaatimuksia tietokonelaitteistolle, joten erityisesti tietokoneen keskusmuistin määrään täytyi kiinnittää huomiota. Suuri tietokoneen näyttö ja tarkempi resoluutio helpottivat myös tiheiden pistepilvien visuaalista ku-

vatulkintaa. Kaikki mitattujen ja johdettujen puustotunnusten lasketukset ja taulukoinnit tehtiin Excelin apuohjelmista ladattavilla analyysityökaluilla ja taulukkolaskentaohjelmilla.

8.9 Korkeusmallin luominen

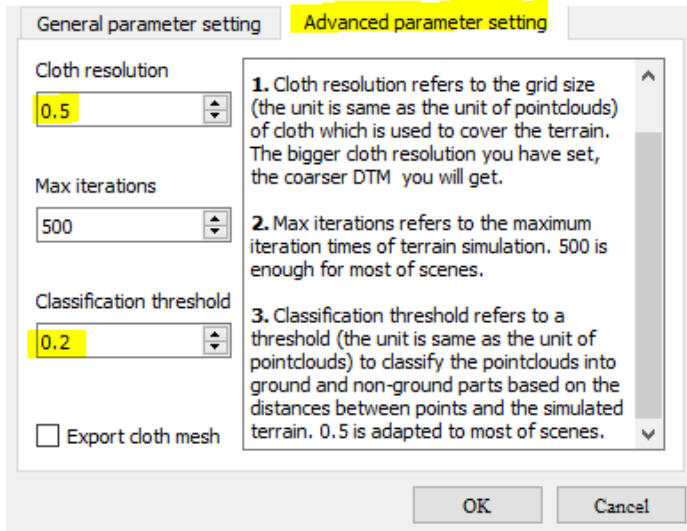
Tavoitteena oli maanpinnan pisteiden (ground points) ja maanpinnan yläpuolisten pisteiden (off-ground points) erittely, jotta korkeusmalli voitiin muodostaa. CloudCompare-ohjelmisto tarjosi hyödyllisen työkalun (Cloth Simulation Filter, CSF) pisteiden erittelyyn. CSF on algoritmi, joka kääntää alkuperäisen pistepilven ylösalaisin. Tämän jälkeen ”kangas” laskostuu käänteiselle pinnalle jäljitellen pistepilven oletettujen maanpintapisteiden pinnanmuotoja (Zhang ym. 2016, 3). Pistepilveä harvennettiin algoritmien lasketusten nopeuttamiseksi. CSF löytyy CloudCompare-ohjelmiston apuohjelmista (Plugins), ja työkalun saa aktiiviseksi valitsemalla pistepilvitiedoston. Tarkan DTM-mallin luomisen keskeisimpinä esteinä ovat epätasainen ja monimutkainen maasto, tiheä kenttäkerroksen kasvusto, katvealueet sekä kojeasemalta katsottuna etäisyyden lisääntyessä kasvaneet pistevälit (Liang ym. 2018, 148).

Yleiset asetukset (General parameter) (kuva 13) säädettiin vastaamaan kohdemetsikön topografisia piirteitä vastaaviksi, koska kyseessä ei ollut jyrkkiä maastonmuotoja sisältävä maasto, vaan pientä kaltevuutta omaava, valittiin Scenes;Relief (korkeuseroja).



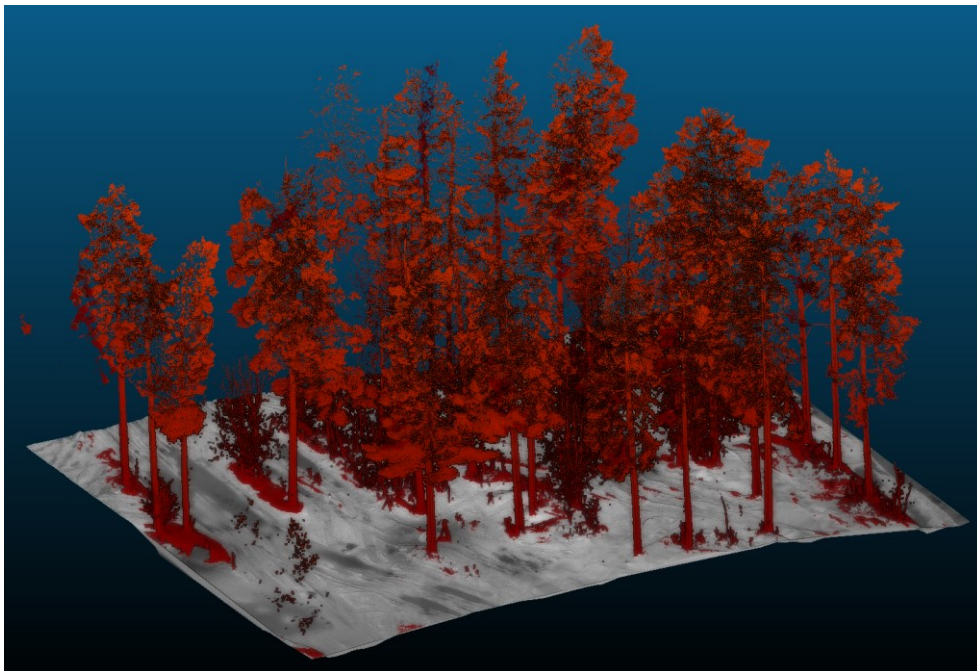
KUVA 13. CSF:n yleisten asetusten (general parameter) määrittäminen

Edistyneiden asetusten (Advanced parameter) (kuva 14) osalta päädyttiin käyttämään arvoja 0.5 (Cloth resolution – DTM:n resoluutio), 500 (Max iteration – Maastomallin luomiseen käytettyjen toistojen määrä) ja 0.2 (Classification threshold – pistetiheyttä määrittävä kynnyisarvo).



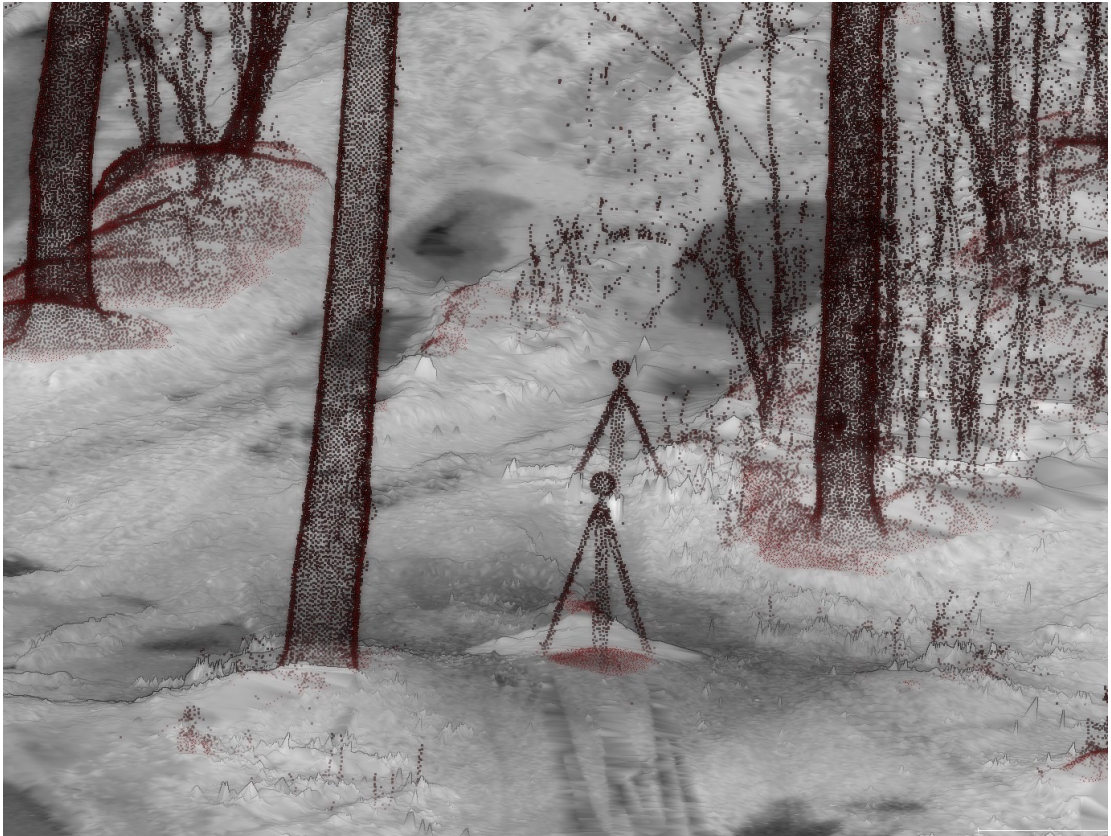
KUVA 14. CSF:n edistyneempien asetusten (advanced parameter) määrittäminen

CSF-algoritmin laskelmien jälkeen syntyi siis kaksi erillistä pistepilviedostoa (kuva 15). Eli oletettuun maanpintaan kuuluvat pisteet (DTM_{points}), sekä oletetun maanpinnan yläpuoliset pisteet (Above Ground, AG_{points}).



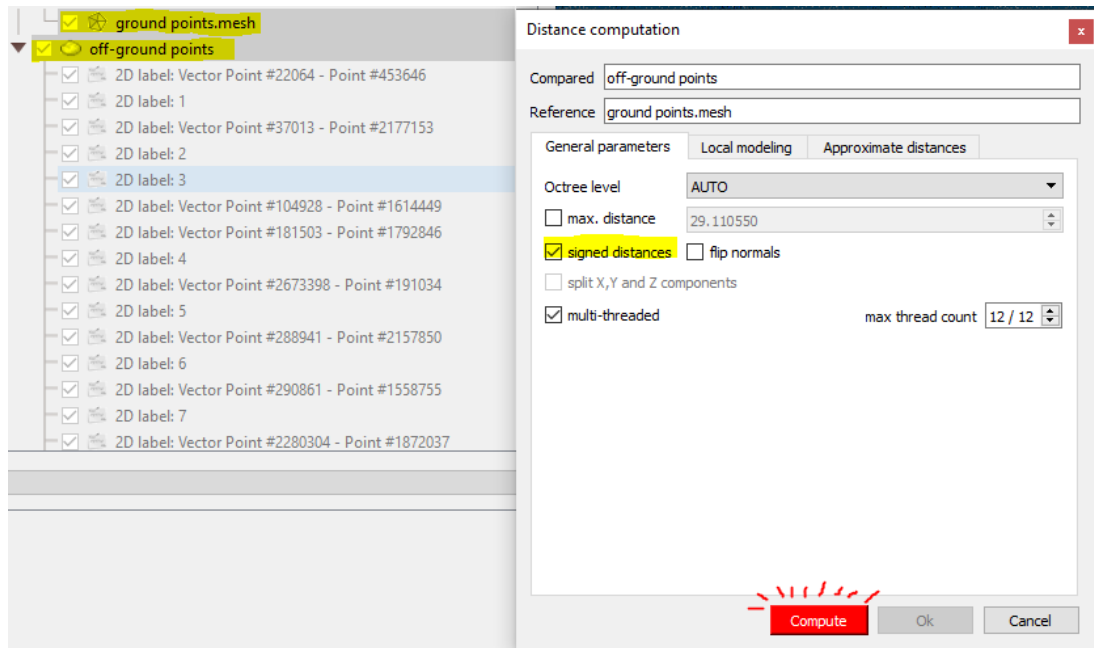
KUVA 15. CSF:n muodostamat pistepilvet: DTM_{points} (harmaa) ja maanpinnan yläpuoliset pisteet, AG_{points} (punainen).

Tarkan korkeusmallin muodostamiseksi CSF-algoritmin muodostamasta maastomallista, joka oli vielä pistepilvitiedosto (DTM_{points}), muodostettiin mesh-malli. Mesh-malli on kolmiulotteinen kolmioverkkomalli (eng. mesh – suom. verkon silmä[koko]), joka koostuu lukuisista polygoneista. Mitä tiheämmin vastinpisteitä on saatavilla, sitä yksityiskohtaisempi verkkomalli saadaan muodostettua (kuva 16). Valittiin CloudCompare-ohjelmistosta Edit → Mesh → Delaunay 2.5 (best fitting plane) ja toteutettiin laskenta, jolloin saatiin muodostettua uusi digitaalinen maastomalli, mutta polygoneista koostuva (viitataan tähän DTM_{mesh}).



KUVA 16. DTM_{points} -tiedostosta muodostettu DTM_{mesh} -tiedosto

Viimeinen vaihe korkeusmallin luomisessa oli maan yläpuolisten pisteiden (off-ground points [cloud]) absoluuttisten etäisyyksien laskettaminen (absolute signed distance) muodostettuun mesh-malliin (ground points [DTM_{mesh}]) viitaten (kuva 17) (Girerdeau-Montaut 2015).

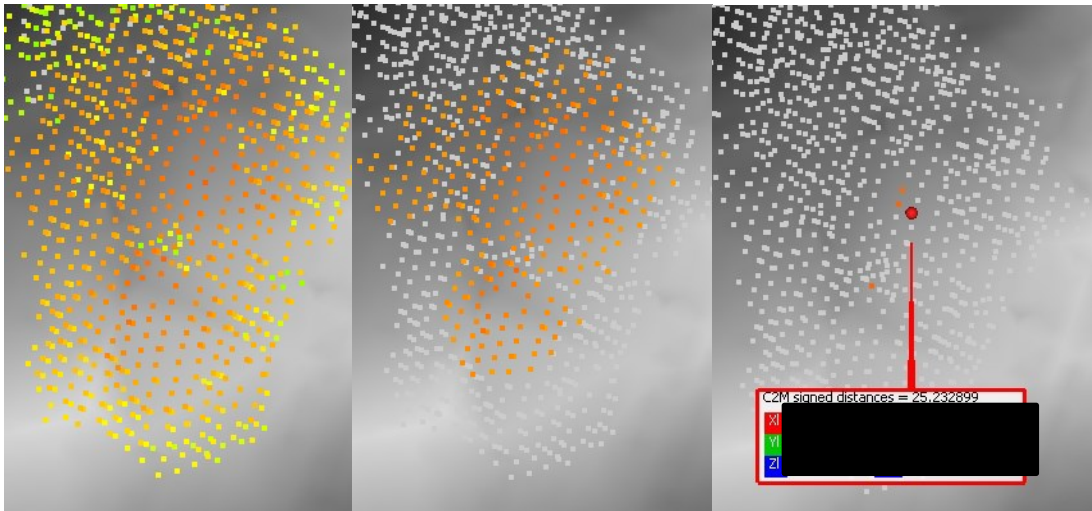


KUVA 17. C2M lasketusta varten asetetut asetukset

MML:n tuottamalle laserkeilausaineistolle ei tarvinnut erikseen tehdä pistepilven pisteiden luokittelua, sillä MML:n tarjoamassa aineistossa pisteet ovat valmiiksi luokiteltu maanpinta- ja kasvillisuuspisteisiin (taulukko 1). Harvapulssisemmän laserkeilausaineiston osalta korkeusmallin luominen oli siis huomattavasti suora-
viivaisemmin toteutettavissa oleva prosessi.

8.10 Puun pituuden (h) määrittäminen

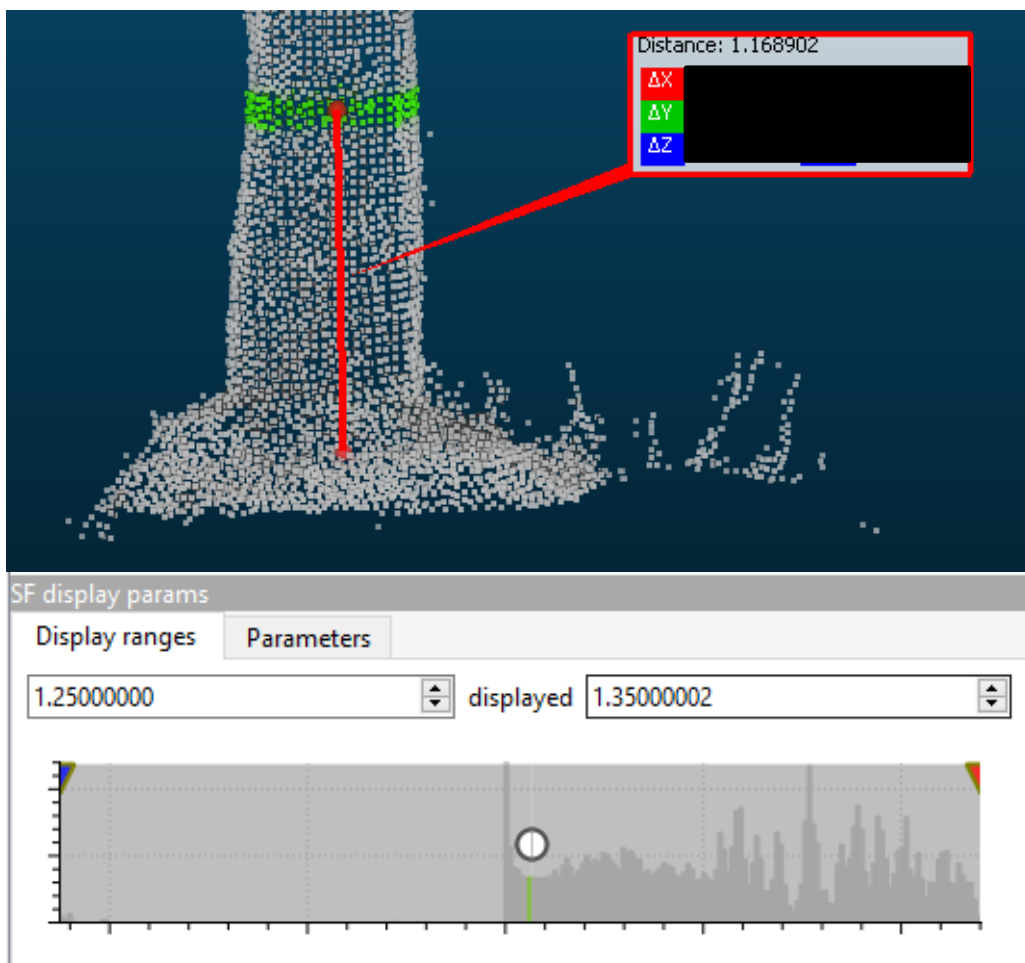
Yksittäisen puun pituus määritettiin muodostettujen maasto- ja korkeusmallien pohjalta. TLS aineistosta mitattiin pisteiden poimintatyökalulla (Point Picking - Distance) puun syntypisteen ja latvuksen korkeimman kohdan välinen etäisyys. Latvuksen korkeimman pisteen havaitsemisen tukena hyödynnettiin pistepilven näyttöalueen skaalausta (kuva 18). Kahden kolmiulotteisessa koordinaatistossa, samalla akselilla, sijaitsevat pisteet ovat hyvin harvoin kohtisuoraan toisiaan vasten. Puun syntypisteen ja latvuksen korkeimman pisteen z-akselin arvot ($+Z_{latvus} - +Z_{syntypiste}$) oli siis vähennettävä toisistaan, jotta absoluuttinen etäisyys saatiin laskettua. Ilmasta käsin keilatusta laserkeilausaineistosta ei voitu yksittäisen puun syntypistettä määrittämään, joten latvuksen korkeimman pisteen arvo jäi voimaan.



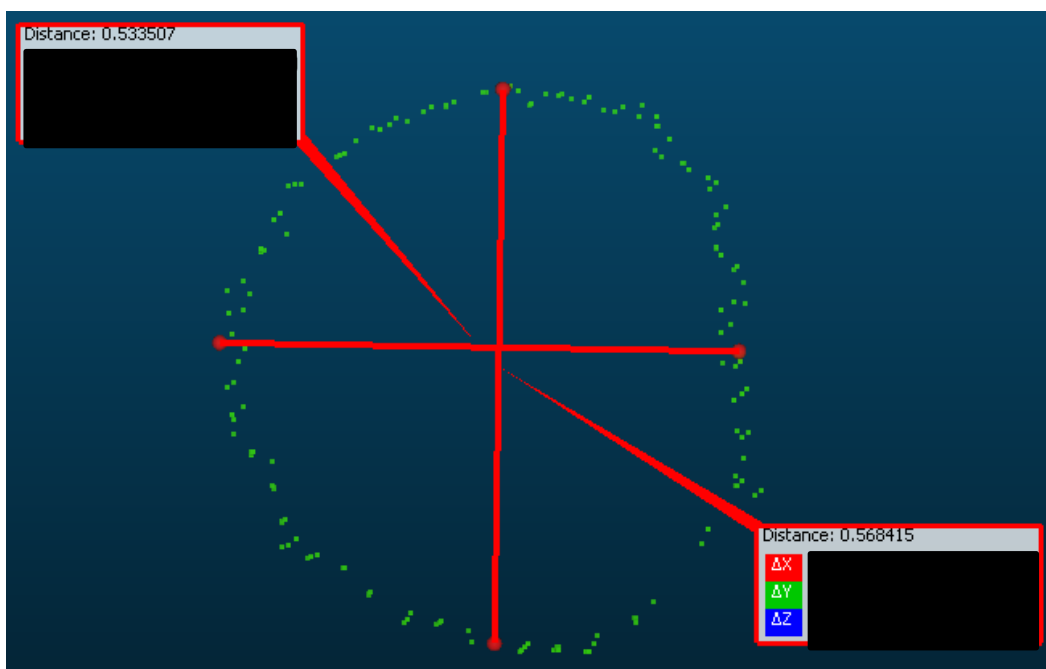
KUVA 18. Näyttöalue skaalataan korkeusarvon maksimiarvon suuntaan, kunnes puuyksilön korkein piste on poimittavissa.

8.11 Puun rinnankorkeusläpimitan määrittäminen TLS-aineistosta

TLS-laserkeilausaineiston osalta rinnankorkeusläpimitta päädyttiin mittaamaan manuaalisesti (kuva 19–20). Puun syntypiste määritettiin valitsemalla puun tyveltä parhaiten syntypistettä vastaava piste, minkä jälkeen rinnankorkeusläpimittaa kuvaavan pistejoukon näyttöaluetta skaalattiin todelliseen rinnankorkeusläpimitaan, eli 1.25–1.35 m korkeuteen puun syntypisteestä. Kuvasta 19 voidaan havaita automaattisesti ”rinnankorkeuteen” skaalautuvan näyttöalueen harha. Puun rinnankorkeusläpimitana käytettiin kahden toisiaan kohtisuoraan mitattujen läpimittojen keskiarvoa (kuva 20). Pisteiden poimintatyökalulla (Point Picking) valittiin puun rinnankorkeudelta leikatusta pistejoukosta pisteitä. Vastinpisteiden osalta varmistettiin, että ne olivat tarkasti samassa tasossa.



KUVA 19. Pisteiden näyttöalue rinnankorkeudelta (1.25–1.35 m). Etäisyys tästä puun syntypisteelle on kuitenkin n. 1,16 m.

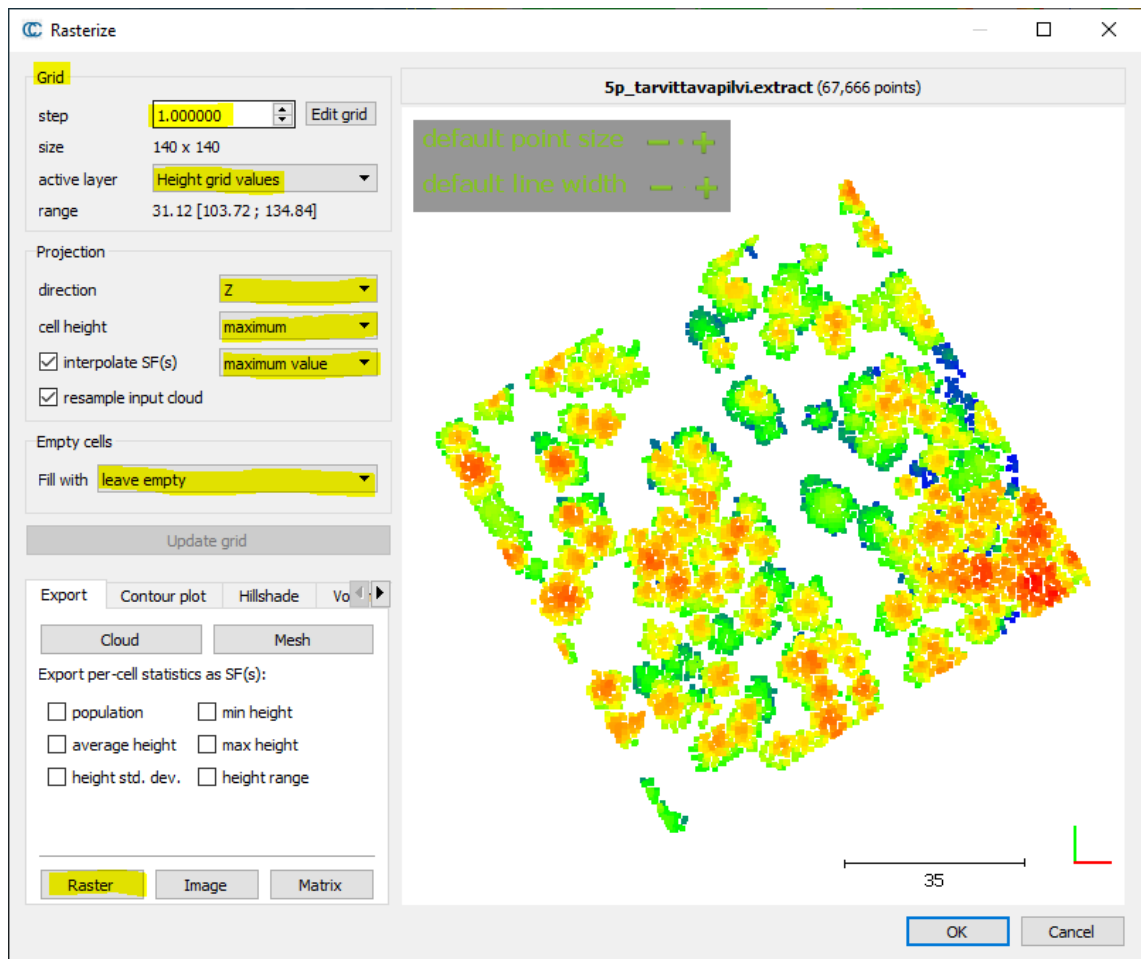


KUVA 20. Vastinpisteiden manuaalinen asettelu rungon rinnankorkeusläpimitan kohdalta "leikatulle" pistejoukolla.

8.12 Puun DBH:n määrittäminen ALS-aineistosta

Ilmasta käsin keilatusta pistepilvestä (ALS) ei pystytty rinnankorkeusläpimittaa suoraan mittaamaan. Syinä tähän ovat lähinnä katselukulmasta ja alhaisemmasta pistetiheydestä johtuen heikko pisteiden muodostuminen puiden rungoille. Puun rinnankorkeusläpimitta oli kuitenkin mallinnettavissa puun latvuksen tunnusten avulla.

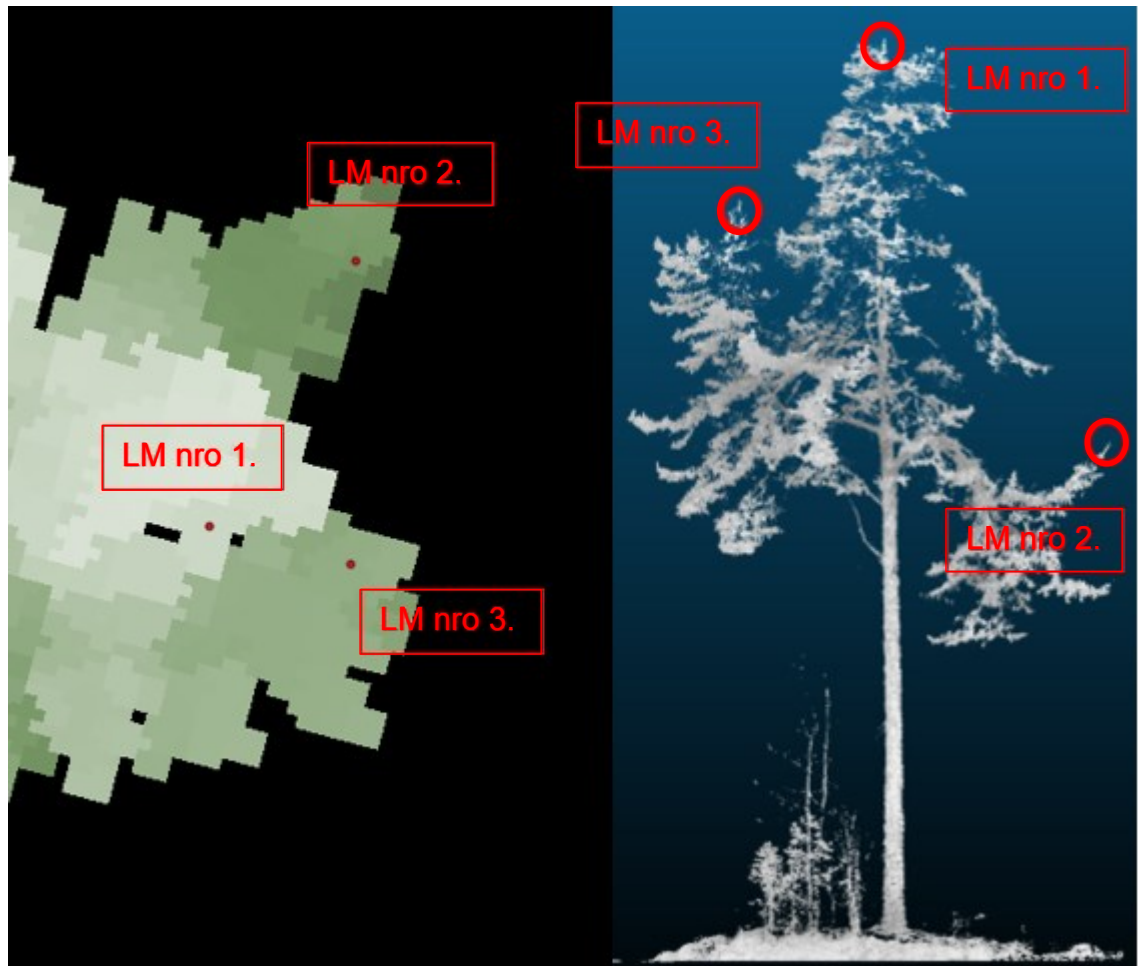
Latvuksen pinta-ala arvioitiin QGIS-ohjelmistossa, hyödyntäen lukuisia rasteriaineiston analysointiin ja editointiin suunniteltuja työkaluja ja algoritmeja. Ennen kuin työskentely voitiin siirtää QGIS-ohjelmiston puolelle, oli pistepilvi projisoitava 2D-muotoon, eli käytännössä konvertoitava LAS-tiedostoformaatti rasterimuotoiseksi. CloudCompare-ohjelmiston puolella aktivoidaan tarkastelun kohteena oleva pistepilvi → Valitaan yläpalkista työkalut (Tools)-välilehti, ja pudotusvalikosta projisointi (Projection) → rasterointi (Rasterize). Vietävälle rasterikuvalle haluttiin tallentaa jokaiselle rasteripikselille korkeusmallin mukainen suurin numeerinen korkeusarvo (kuva 21) Rasterikuvia projisoitiin samasta pistepilvestä kaksi erillistä TIFF-formaatin mukaista rasterikuvaa. Ensimmäinen rasterikuva tulisi olemaan resoluutioltaan 140 x 140 px, johon viitataan jatkossa CHM_{LOW}. Toinen rasterikuva tulisi olemaan resoluutioltaan huomattavasti terävämpi, 697 x 694 px, johon viitataan jatkossa CHM_{HIGH}.



KUVA 21. CloudCompare-ohjelmiston pistepilvien rasterointityökalu

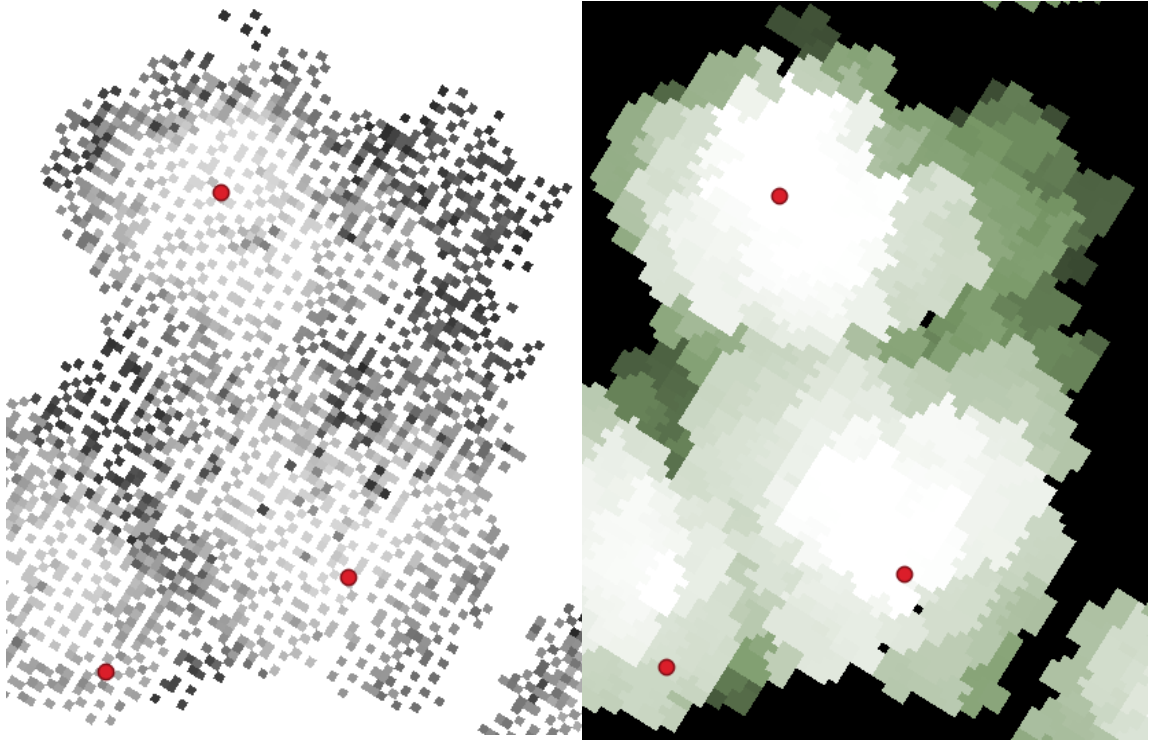
CHM_{Low} rasterikuvan avulla oli tarkoitus selvittää jokaisen puun korkein kohta, Local Maxima (paikallinen maksimi) -algoritilla, jotta yksittäiset puut saataisiin paikannettua. LM-pisteiden oletettiin olevan latvusten korkeimpia kohtia, jotka havainnollistaisivat latvusten jakaantumista pisteen välittömään läheisyyteen (Räty ym. 2011, 3).

Paikallisia maksimeja (kuva 22) ei kuitenkaan käytetty latvusten segmentoinnissa Watershed (vedenjakaja) -algoritmin osalta, joten puiden teoreettisella lukumäärän kasvulla ei ollut merkitystä. Paikallisia maksimeja voidaan siis käyttää Watershed-algoritmissa ikään kuin ”liikennemerkkeinä”, jotka ohjaavat algoritmia. Paikallisia maksimeja verrattiin pistepilvestä mitattuihin yksittäisten puiden korkeimpiin kohtiin. Määritetyt LM-pisteet toimivat referenssitietona myöhemmissä manuaalisissa segmentointivaiheissa.



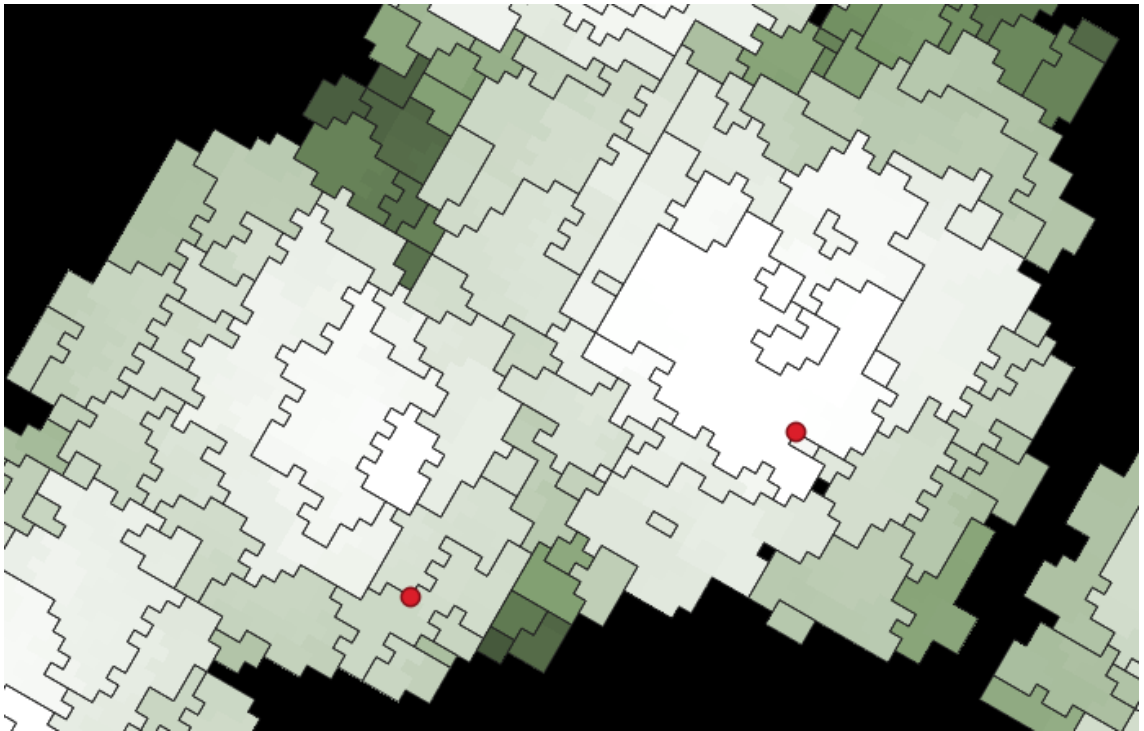
KUVA 22. Männyn latvuksen alimpien oksien epätavallinen levittäytyminen, johti konenäön tulkitsemaan latvuksen periaatteessa kolmeksi puuksi.

Oletettujen puiden latvojen paikannusten jälkeen siirryttiin latvusten segmentointiprosessiin, jossa haluttiin määrittää yksittäisen puun latvuksen rajat rasterikuvasta. Watershed-segmentoinnissa käytettiin CHM_{HIGH} -rasterikuvaa, sillä terävämpi resoluutio myötäili latvusten luonnollisia rajoja tarkemmin (kuva 23).



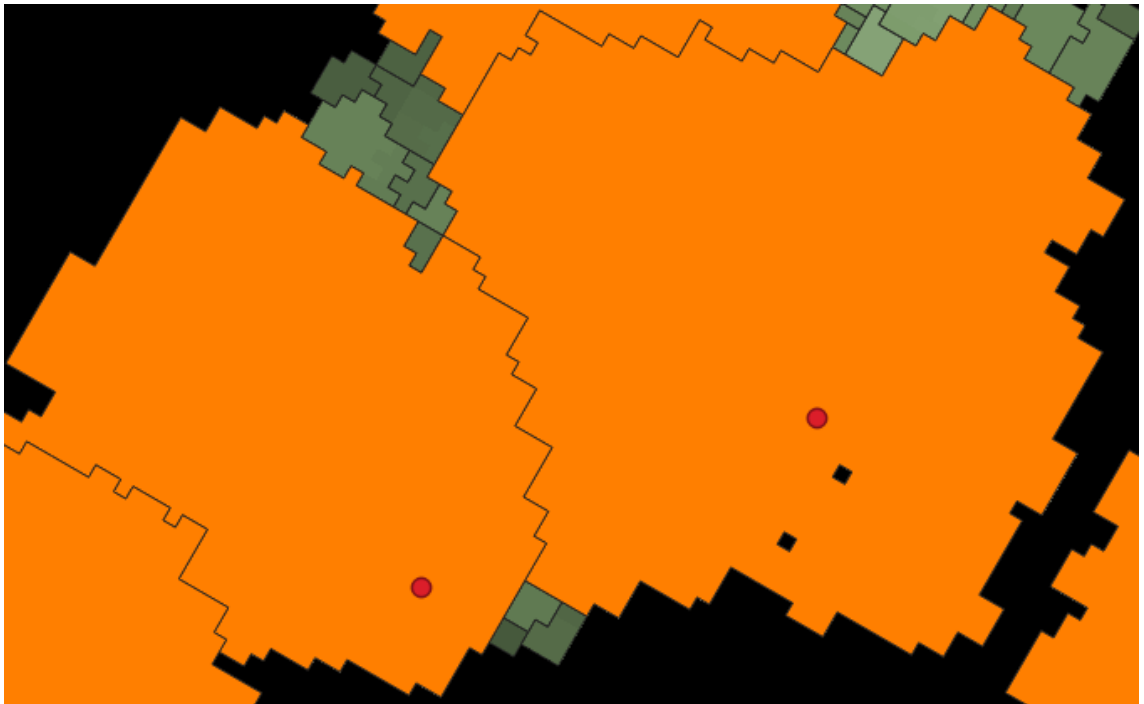
KUVA 23. Watershed-segmentointi (oik.) CHM_{HIGH}-rasterikuvalta (vas.)

Tarkan pinta-alan selvittämiseksi oli rasterimuotoinen aineisto muunnettava vielä vektorimuotoiseksi. Polygonointi tapahtui Polygonize (polygonoi) -algoritmilla, jossa konenäkö pyrkii yhdistämään saman numeerisen arvon sisältävät rasterisolut vektorimuotoisiksi polygoneiksi. Polygonoinnissa muodostui kuitenkin useita pienempiä segmenttejä (kuva 24), jotka oli yhdistettävä, jotta paikannetun puun latvus tulisi paremmin mallinnettua. Pienempien polygonisegmenttien yhdistäminen tapahtui valitse ominaisuus (Select Feature) -toiminnolla. Paikannetun puun latvuksen rajojen tulkinta tapahtui monilähteisesti. Suurempien korkeusarvojen polygonisegmentit (vaaleammat vihreän sävyt) nähtiin lähtökohtaisesti kuuluvan valtapuun latvukseen. Tulkinnan tukena käytettiin lisäksi ilmakuvia ja pistepilviä.



KUVA 24. Polygonoinnissa rasterimuotoinen tieto muuttuu vektorimuotoiseksi

Tyydyttävän latvuksen rajauksen, eli polygonisegmenttien valinnan päätteeksi muodostettiin valituista polygonisegmenteistä yksi yhtenäinen polygonisegmentti Dissolve (sulata/liueta) -algoritmilla. Algoritmi yhdistää valittujen vektoritasojen ominaisuudet uusiksi ominaisuuksiksi. Mikäli syötettävät vektorit ovat polygoneja, sulatettavien polygonien yhteiset rajat poistetaan (kuva 25). Yhtenäistä latvusta edustaville polygonisegmenteille laskettiin vielä pinta-ala, jotta tarvittava latvuksen tunnus (latvuksen läpimitta, D_{CRM}) saataisiin johdettua. Yksittäisen polygonisegmentin ominaisuustietotauluun (Attribute Table) lisättiin editoimalla uusi kenttä, johon kenttälaskin (Field Calculator) -työkalua hyödyntämällä laskettiin polygonisegmentin pinta-ala. Pinta-alat laskettiin \$area (pinta-ala) -geometria-funktiolla, joka noudattaa sekä nykyisen projektin ellipsoidiasetuksia että pinta-alayksikön asetuksia.



KUVA 25. Paikannettujen mäntyjen latvuksia edustavat polygonisegmentit.

8.13 Kaavat ja mallit

Työssä käytettiin Repolan (2008, 2009) laatimia männyn (4) ja koivun (5), kahden selittävän muuttujan, maan yläpuolisen biomassan estimointimalleja. Maan yläpuolista biomassaa on kaikki kantoleikkauksesta, eli 1 % maanpinnan tasosta, puun latvaan.

$$\ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \left(\frac{d_{ski}}{d_{ski}+12} \right) + b_2 \left(\frac{h_{ki}}{h_{ki}+20} \right) + u_k + e_{ki} \quad (4)$$

$$\ln(y_{ki}) = b_0 + b_1 \left(\frac{d_{ski}}{d_{ski}+12} \right) + b_2 \left(\frac{h_{ki}}{h_{ki}+22} \right) + u_{5k} + e_{5ki} \quad (5)$$

, joissa y_{ki} on puun kokonaisbiomassa puulle i metsikössä k (kg), d_{ski} on $2 + 1.25d_{ki}$ (d_{ki} =puun rinnankorkeusläpimitta puulle i metsikössä k , cm) ja h_{ki} on puun korkeus puulle i metsikössä k (m). Tekijä u_k on metsikön k satunnainen varianssi ja e_{ki} puun i jäännösvirhe metsikössä k . Maan yläpuolisten biomassamallien parametrit ovat esitettyinä taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Repolan maan yläpuolisen biomassamallien (3, 4) parametrit.

Muuttuja	Puulaji	
	Mänty	Koivu
b0	-3.198	-3.654
b1	9.547	10.582
b2	3.241	3.018
var(u_k)	0.009	0.00068
var(e_{ki})	0.01	0.00727

Latvuksen läpimitta (D_{CRM}) selvitettiin oheisella kaavalla (6) (Hyyppä ym. 2001, 973), jossa A merkitsee latvuksen pinta-alaa. Johdettu latvuksen läpimitta sijoitettiin edelleen rinnankorkeusläpimittaa mallintavaan kaavaan (7) (Kalliovirta & Tokola 2005, 232), jossa h on puun korkeus desimetreinä ja d_{crm} puun latvuksen läpimitta desimetreinä.

$$D_{CRM} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (6)$$

$$\sqrt{d_{1,3}} = f(\sqrt{h}, \sqrt{d_{crm}}) + \varepsilon \quad (7)$$

$$d_{1,3} = f(\quad)^2 + \text{var}(\varepsilon)$$

On syytä huomauttaa, että käytettyjen rasterikuvien resoluutioiden, kuten Watershed-algoritmile asetetut asetukset, perustuivat molemmat yritykseen ja erheeseen. Ilmalaserkeilausaineistosta johdettujen tunnusten tarkkuusluokkien todettiin olevan riittäviä, kun niitä verrattiin TLS-aineistosta johdettuihin tunnuksiin.

9 TUTKIMUKSEN TULOKSET

9.1 Tutkimusalueen puuston tilastollisia arvoja

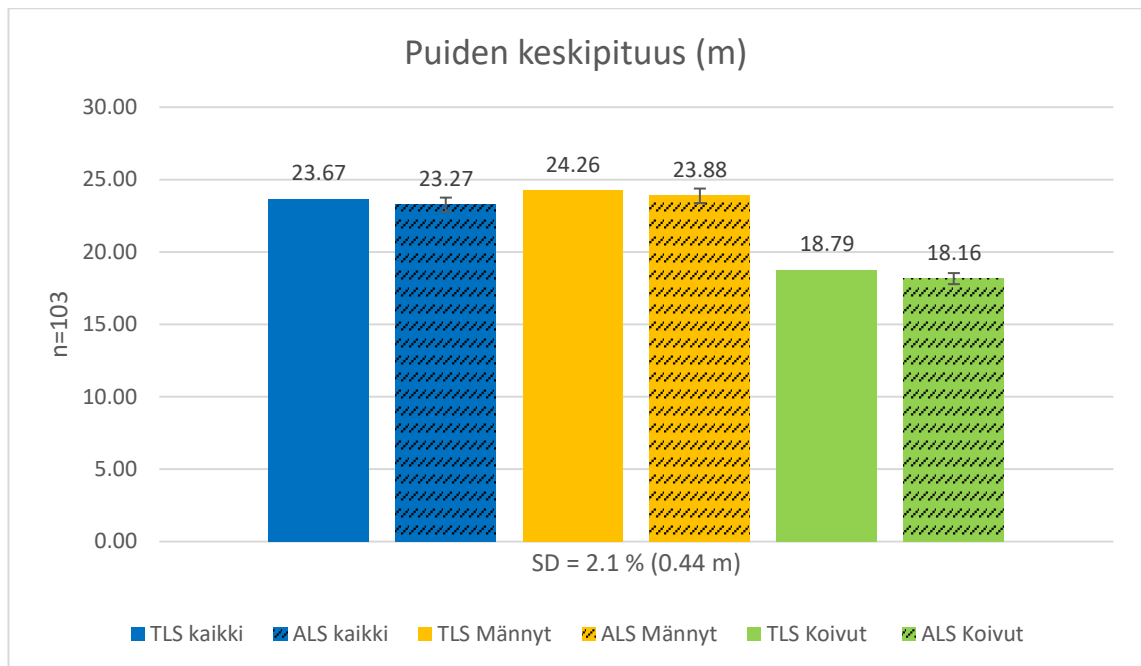
Inventointialueen puuston järeys voidaan havaita oheisesta taulukosta 7. Keskiläpimitta oli männyllä molemmista laserkeilaukseen perustuvista aineistoista mitattuna 47 cm luokkaa ja keskipituus 24 m luokkaa. TLS-pistepilvestä mitatut puulajikohtaiset maksimiarvot: mänty (68,7 cm & 32,9 m) ja koivu (43,8 cm & 27,1 m).

TAULUKKO 7. Laserkeilausaineistoista mitattuja ja johdettuja tilastollisia arvoja

	TLS				ALS			
	N	ka	min	max	N	ka	min	max
d_{1.3} (mm)	109	437			103	454		
mänty	93	469	323	687	92	473	368	610
koivu	16	270	169	438	11	294	225	477
h (dm)	109	232			103	233		
mänty	93	243	188	329	92	239	190	289
koivu	16	174	138	271	11	182	134	263

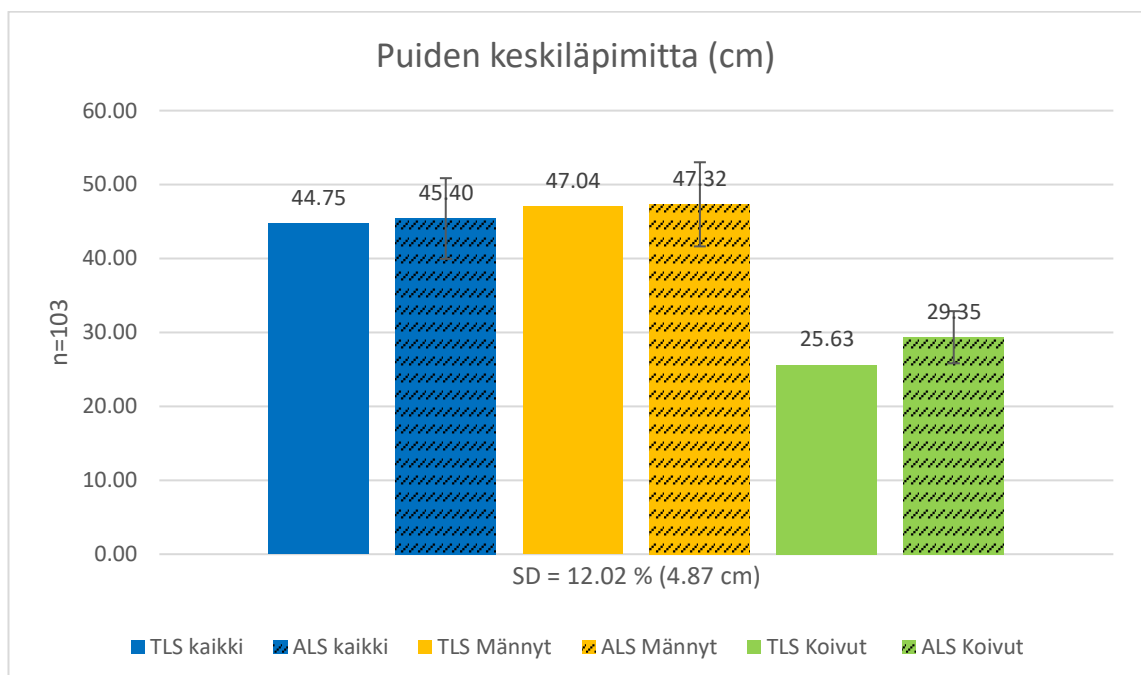
9.2 Mitatut ja mallinnetut puustotunnukset

Puiden keskipituuden suhteellinen vaihtelu oli vähäisintä kaikista mitattavista perus- ja johdettavista tunnuksista. TLS menetelmällä mitattujen puiden keskipituus oli 40 cm (1.71 %) pidempi, kuin ALS laserkeilausaineiston pohjalta mitatun puuston keskipituus (kuvio 15). Kaiken kaikkiaan vain 12 puuta (11.65 %) oli pidempiä ALS-aineistossa verrattuna TLS-aineistoon. Keskihajonta (Standard Deviation, SD) ALS aineiston ja TLS aineistosta mitatuilla puilla oli 44 cm (2.1 %).



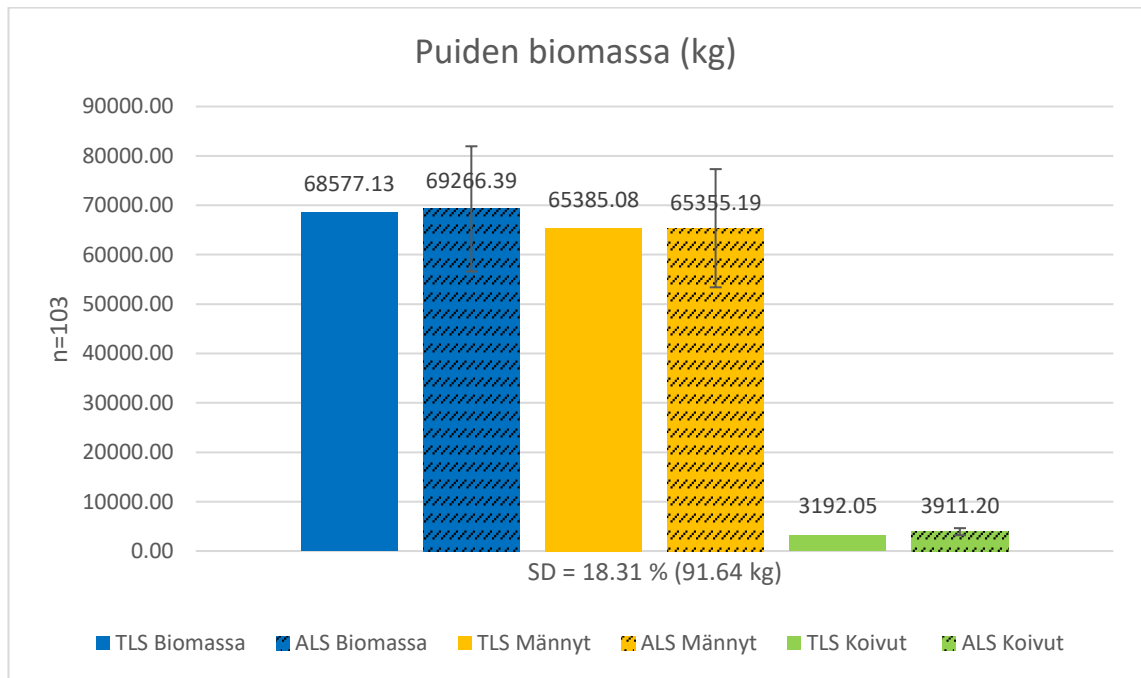
KUVIO 15. Puiden keskipituudet ja -hajonta

Puuston keskiläpimitassa (kuvio 16) oli havaittavissa jo huomattavasti suurempaa hajontaa keskipituuksiin verrattuna, keskihajonnan ollessa ALS aineiston osalta yli 12 % (4.87 cm). TLS aineistosta **mitattujen** puiden keskiläpimita oli vain 0,65 cm (1.46 %) pienempi, kuin mitä ALS aineistosta latvuksen tunnusten pohjalta **mallinnettu** keskiläpimita.



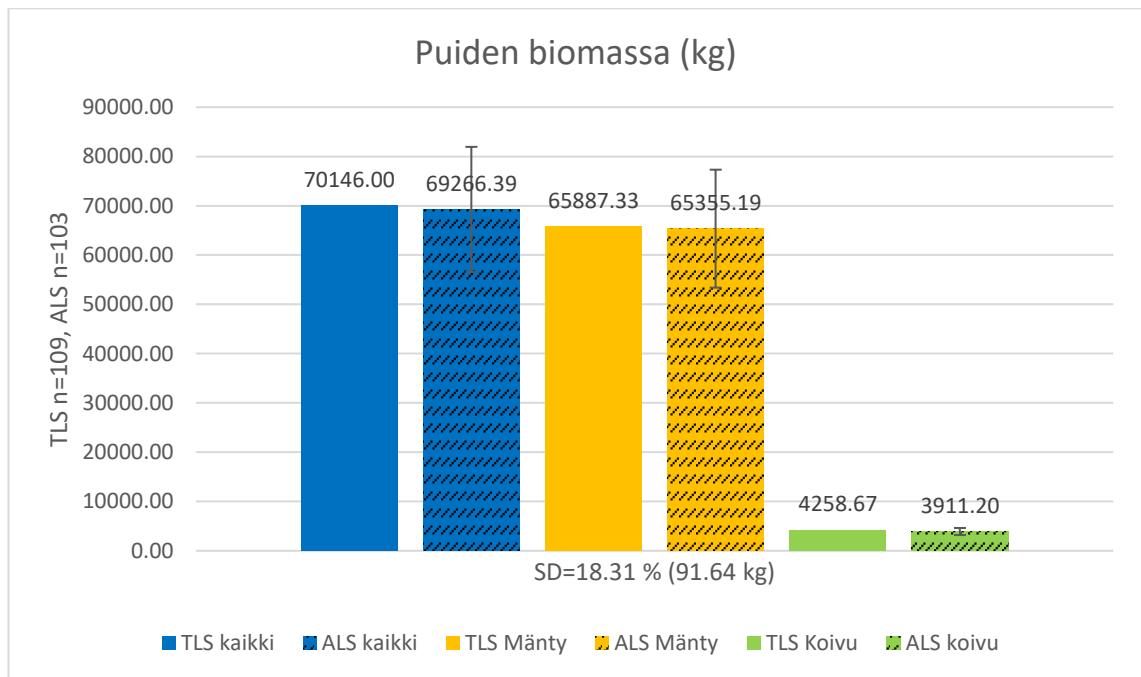
KUVIO 16. Puiden keskiläpimitat ja -hajonta

ALS aineiston pohjalta mallinnettu kokonaisbiomassa oli vain n. 689 kg suurempi (1.01 %), kuin TLS aineiston pohjalta mallinnettu biomassa (kuvio 17). Keskihajonta oli kaikkien työssä mitattujen tai mallinnettujen puustotunnusten osalta suurinta 18.31 % (91.64 kg). Esitetyt arvot ovat Repolan (2008, 2009) mallien mukaisesti **kuivabiomassaa**.



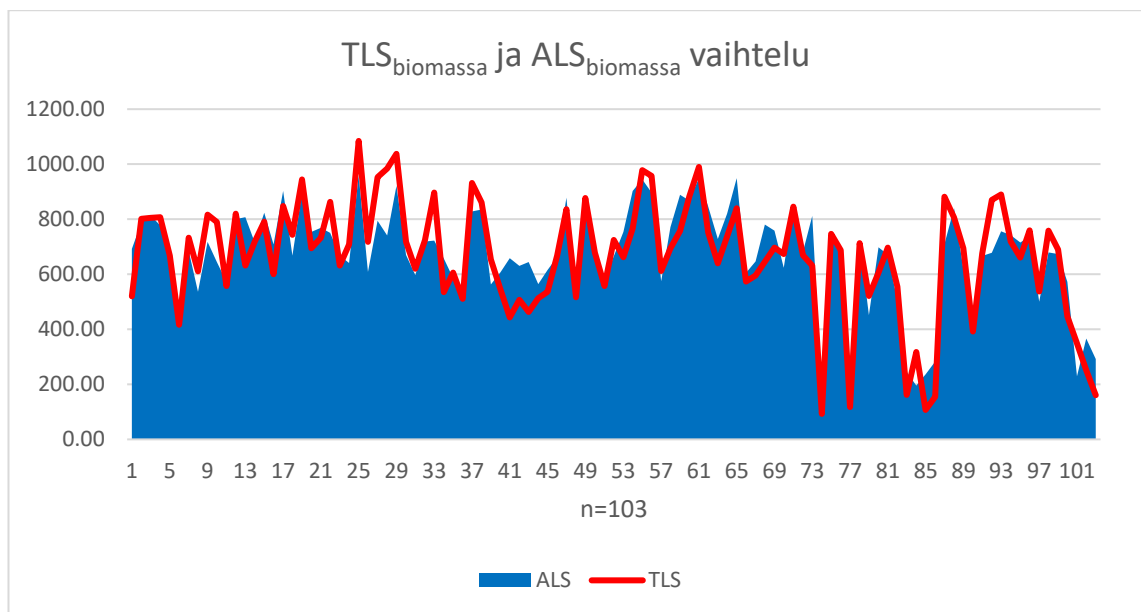
KUVIO 17. Kohdemetsikön biomassa systemaattisilla otoksilla

Selvennykseksi TLS menetelmän eduista on oheisessa kuviossa (kuvio 18) esitetty myös ”rajoittamaton systemaattinen otos”, jossa näyttäytynyt alikasvos on huomioitu. Muutaman puun (1 mänty, 5 koivua) tuoma lisäys kokonaisbiomassaan ei muuta tulosta merkittävästi (1,25 %/879.61 kg).



KUVIO 18. Kohdemetsikön biomassa ”rajoittamattomilla” alkiolla

Eri laserkeilausaineistojen pohjalta mallinnetut puukohtaiset biomassan määrät vastaavat hyvin toisiaan (kuvio 19). Biomassan vaihtelu vaikuttaa muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta eri aineistoiden osalta hyvin yhtenevältä.

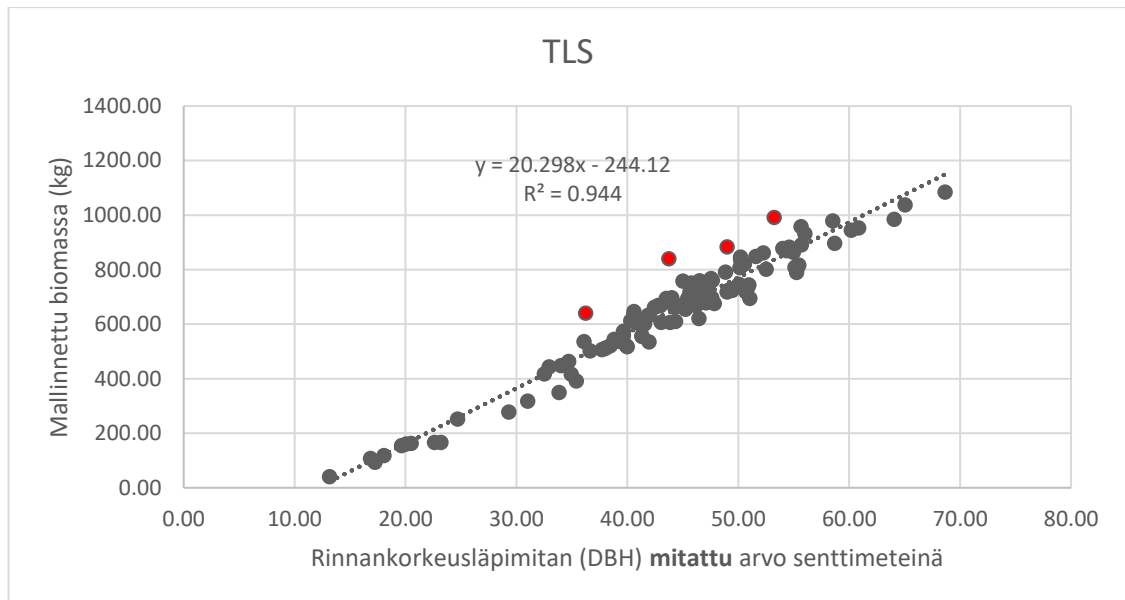


KUVIO 19. Puuyksilöiden biomassojen vastaavuus

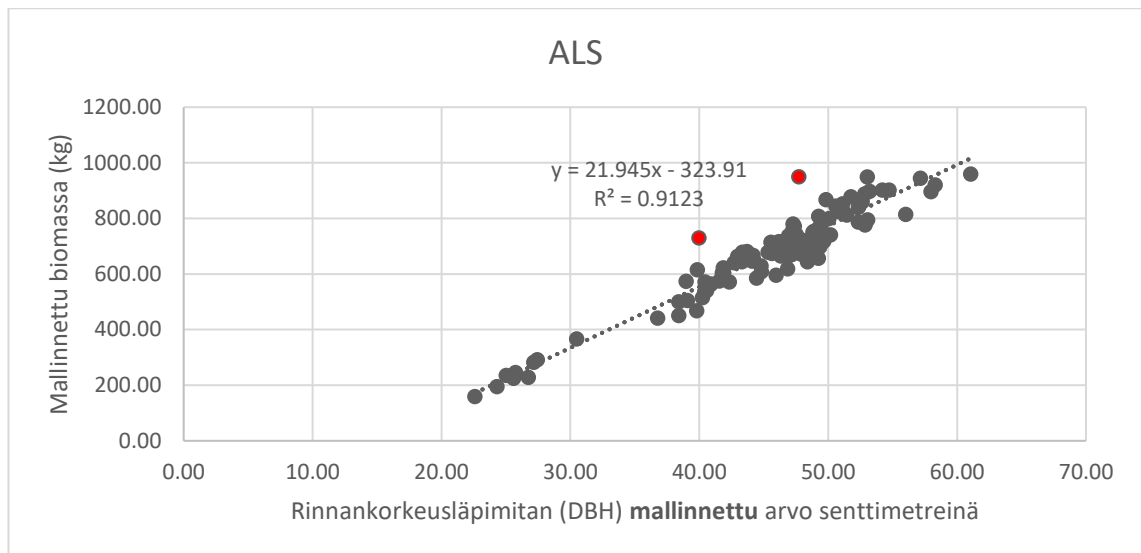
9.3 Mallinnetun biomassan hajontakuviot

Oheisessa kuviossa (kuvio 20) on esitettyä TLS aineiston pohjalta **mitattujen** tunnusten perusteella mallinnettu biomassa ja sen vahva selitysaste ($R^2=0.94$) ja korrelaatio ($R=0.972$) rinnankorkeusläpimitan kanssa. Jäljempässä kuviossa (kuvio 21) on esitettyä ALS aineiston pohjalta **mallinnetun** rinnankorkeusläpimitan ja mallinnetun biomassan voimakas selitysaste ($R^2=0.91$) ja korrelaatio ($R=0.955$).

TLS aineiston osalta selityskerroin (R^2) on 0.944 eli 94.4 %. Tämä voidaan tulkita seuraavasti: 94.4 % biomassan vaihtelusta voidaan selittää mitatun rinnankorkeusläpimitan vaihtelulla (Taanila 2020, 7).



KUVIO 20. TLS biomassan ja rinnankorkeusläpimitan hajontakuvio



KUVIO 21. ALS biomassan ja rinnankorkeuslähpimitan hajontakuvi

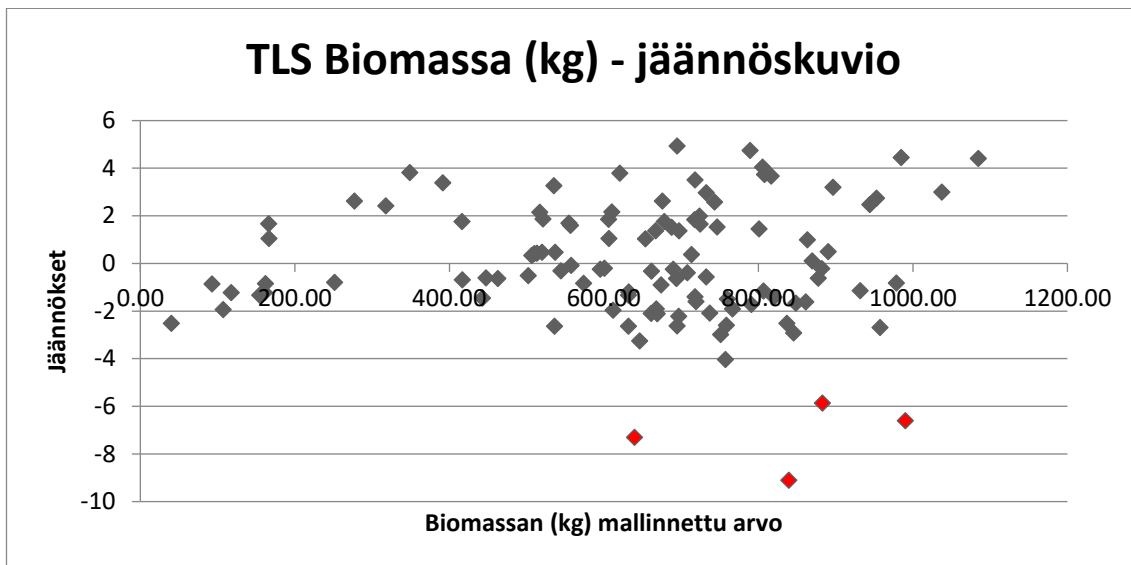
Merkittäviä poikkeavia arvoja ei hajontakuvioiden havaittu, joten vähäisten poikkeavuuksien vaikutusta keskiarvoon ja korrelaatiokertoimeen ei selvitetty. Punaisella merkityjen (kuviot 20–21), poikkeavien havaintojen pois jättäminen ei kuitenkaan ole perusteltua, sillä pienille poikkeavuuksille löytyy luonnollinen selitys. Poikkeavia havaintoja selittää epänormaalit puuyksilöt, eli puut, jotka ovat esim. poikkeuksellisen lyhyitä ja järeitä tai sitten pitkiä ja solakoita.

9.4 Lineaarinen riippuvuus ja varianssien yhtä suuruus

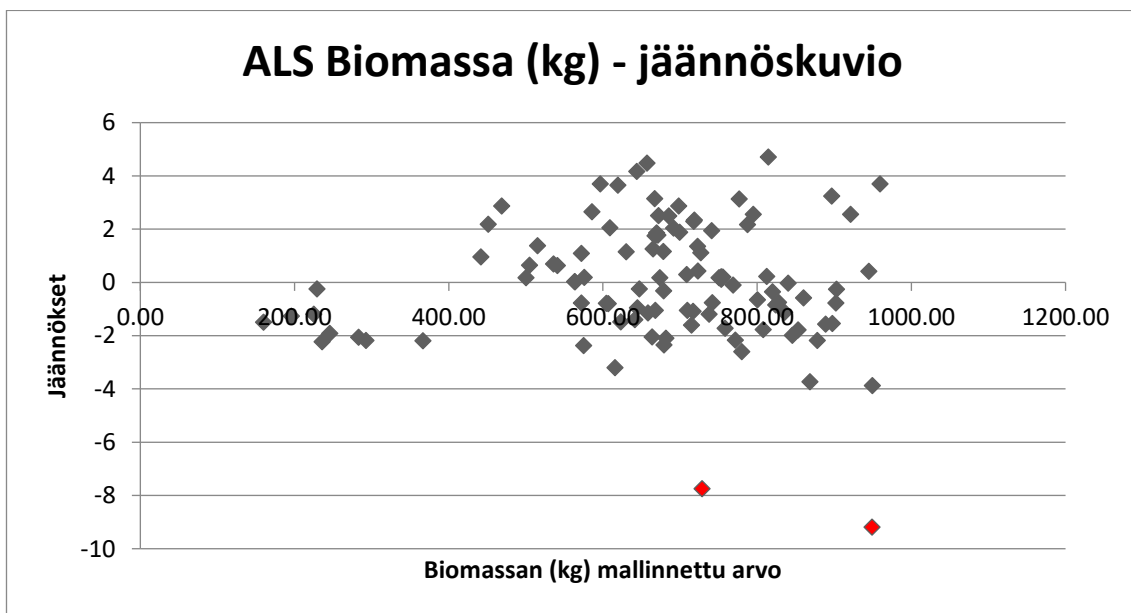
Lineaarisuutta ja jäännösten varianssien yhtä suuruutta tarkasteltiin jäännöskuvioiden avulla (kuviot 22–23). Parhaiten tarkasteluun sopii jäännöstermien hajontakuviot, jossa x-akselilla on mallin ennustamat arvot ja y-akselilla vastaavat jäännökset (Taanila 2020, 12). Jäännöstermien tarkastelua ei pidä sekoittaa aikaisemmin esitettyihin hajontakuvioiden, joissa x- ja y-akselilta löytyy selittävien muuttujien arvot.

Siistissä jäännöskuviossa pisteet ovat jakautuneet satunnaisesti ilman säännönmukaisuutta. Mikäli riippuvuus ei ole lineaarinen, niin se näkyy jäännöskuviossa jonkin asteisena säännönmukaisuutena (Taanila 2020, 13–14). Molemmissa esitetyissä jäännöskuvioissa esiintyy muutamia poikkeavia havaintoja, joita edelleen selittää epänormaalit puuyksilöt (poikkeavat arvot ovat samat, kuin hajontakuvi-

oissa 20–21). Jäännöskuvioiden pohjalta voidaan perustellusti todeta, että lineaarisuutta ei ole merkittävästi rikottu, vaan jäännökset ovat jakautuneet suhteellisen tasaisesti. Tarkemmat tiedot lineaaristen regressiomallien varianssianalyyysien (ANOVA) tilastollisista tunnuksista löytyvät tutkimuksen lopusta (liite 6).



KUVIO 22. TLS_{BIOMASSA} varianssien jäännöskuvio



KUVIO 23. ALS_{BIOMASSA} varianssien jäännöskuvio

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli verrata maa- ja ilmalaserkeilausta puustotunnusten ja biomassan määrittämisen välineenä. Toisena tavoitteena oli myös määrittää biomassan määrä mahdollisimman tarkasti PVTUTKL:n määrittämältä alueelta.

Eri laserkeilausmenetelmin (ALS/TLS) tuotetuista pistepilvistä havaittiin, että mm. homogeenisestä ja harvasta männiköstä on varsin hyvin mallinnettavissa tai suoraan mitattavissa tärkeitä puustotunnuksia. Mikäli kohdemetsikkö olisi ollut tiheämpi, monijaksoinen ja heterogeenisempi, tutkimuksen tulokset olisivat voineet olla hyvin erilaiset.

Tulosten perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että 5p-aineistolla on mahdollista saavuttaa hyvä tarkkuus puuston keskipituuden (h), keskiläpimitan ($d_{1.3}$) ja biomassan (B) aluepohjaisessa määrittämisessä tai mallintamisessa, kun sitä verrataan maanpinnalta tehtyihin ja pistetiheydeltään monin kerroin tiheämpään TLS-aineistoon. Molemmat menetelmät ovat myös lähtökohtaisesti tarkempia aluepohjaisessa puustotulkinnassa, kuin perinteisillä metsänmittausvälineillä toteutetut mittaukset. TLS-aineiston pohjalta voidaan myös määrittää yksittäisen puun tärkeimpiä puustotunnuksia perinteisiä metsänmittausvälineitä tarkemmin.

Tietoa todellisesta biomassan määrästä tai muidenkaan puustotunnusten tarkkuuksista ei ole, sillä kohdemetsikön puustoa ei kaadettu. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää riittävän tarkkoina tai vähintäänkin oikean suuntaisina. Kohdemetsikön puustosta eri laserkeilausmenetelmillä suoraan mitatut tai puuston muiden puustotunnusten pohjalta mallinnetut puustotunnukset olivat hyvin lähellä toisiinsa. Tulokset olivat myös loogisia, eivätkä ne merkittävästi eronneet relaskoopikoealojen pohjalta arvioiduista puustotunnusten arvoista. Biomassan määrä olisi voitu määrittää kohdemetsikön puustosta vielä huomattavasti tarkemmin, mikäli kohdemetsikön puustosta olisi mitattu Repolan (2008, 2009) laatimia biomassamalleja tarkentavia puustotunnuksia, suoraan kentällä tai sitten tuotettujen pistepilvien pohjalta.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa PVTUTKL:lle perustutkimusta tukevaa tietoa laserkeilaukseen ja biomassaan liittyen. PVTUTKL voi hyödyntää saavutettuja tuloksia ja maalaserkeilaimella tuotettua aineistoa omassa tutkimustoiminnassa tai muissa organisaation sisäisissä toiminnoissa.

Visuaalisella kuvatulkinalla on vielä suuri merkitys aineistojen tulkinassa. Automaattinen kuvatulkinna ei välttämättä vieläkään osaa tulkita aineiston aukko-kohtia yhtä loogisesti, kuin mihin ihminen kykenee, mistä johtuen tilastollista harhaa saadaan laskettua, eri menetelmistä riippuen, jopa yli 10 % (Kankare ym. 2013c, 2270). Tässäkin työssä visuaalisella kuvatulkinalla oli merkittävä vaikutus mitattavien perus- ja johdettavien tunnusten tarkkuuden suhteen. Koska TLS aineisto tulkittiin ensin, muodostui tulkitsijalle suhteellisen tarkka kuva metsikön ja sen puiden rakenteesta, jonka sivuuttaminen esim. ALS aineiston tulkinan vaiheissa oli käytännössä mahdotonta. Tulkitsija siis ”tiesi” miten yksittäisten puiden latvukset jakaantuivat huomattavasti epäterävämmällä kuvalla, joten yksittäisten latvusten rajaaminen helpottui.

Pistepilvitiedostoja pidetään yleensä ”aliohjelmana” kohteesta, sillä pisteväli on monesti varsinaista pistekokoa suurempi. Toisin sanoen ympäristöstä tallentuvat yksittäiset pisteet ja pistejoukot voivat jäljitellä ympäristön kohteita hyvinkin yksityiskohtaisesti, mutta pisteiden väliin jää aina ”kartoittamatonta” pintaa. Erityisesti ALS-menetelmällä tuotettujen pistepilvien kohdalla tämä vaikutus havaitaan hyvin, kun tarkastellaan esim. latvuksen korkeimman kohdan mallinnustarkkuutta. Nyrkkisääntönä voisi olla: Metsän pintojen mittaus- tai mallinnustarkkuus, laserkeilauksen tai algoritmien avulla, heikkenee kohteilla, jotka myös metsätoimihenkilö kokee haasteelliseksi mitata.

Suositteluvia jatkotutkimusaiheita on mm. tunnistusalgoritmien kehittäminen tai niiden pohjalta kehitettyjen työkalujen vapaampi jakelu. Tämäkin työ olisi ollut tuloksellisempi, mikäli käytössä olisi heti alusta asti ollut valmis, vapaasti käytettävä työkalu runkojen tunnistamiseen ja poimintaan. Mitä enemmän ja tarkemmin laserkeilausmenetelmiin soveltuvat algoritmit kykenevät pistepilvien puita tunnistamaan ja puustotunnuksia mittaamaan, sitä tehokkaammin voimme tulevaisuudessa korvata kalliita ja aikaa vieviä menetelmiä, jotka usein edellyttävät puulta

puulle siirtymistä ja monesti vaativat puun kaatamista (esim. biomassan absoluuttinen määrä). TLS-menetelmän korkea mallinnustarkkuus mahdollistaa myös perinteisten puustotunnusten johtamisten lisäksi paljon yksityiskohtaisempien puustotunnusten (esim. runkokäyrä) mallintamisen, joita on hankala saada kentällä selville ilman puun kaatamista.

Tulevaisuudessa pistepilviä tuottavien laserkeilainten koko tulee pienenemään ja hinta tulee laskemaan. Pistepilvien ja LiDAR-menetelmillä tuotetun tiedon tuottaminen droneista (Kuželka ym. 2020, 17), älypuhelimista ja hakkuukoneista (Hollonainen 2019, 2–3) on jo käytännössä mahdollista. Myös informaation ”uuton” (extraction) ja jalostustoiminnan kehittyminen, sekä prosessointikapasiteetin ja tehon kasvu tulee todennäköisesti tukemaan pistepilvien parissa työskenteleviä. Lisäksi multispektrikeyaus, eli monikanavainen laserkeylaustekniikka, tuo laserille värinäön (Kukko, Kaartinen & Hyypä 2019, 17). Laserkeylausteknologiat ovat osoittaneet olevansa todellinen täsmäase tarkentuvan metsävaratiedon, ja erityisesti biomassan (l. hiilinielun) mallintamisessa.

LÄHTEET

Aluevalvontalaki 18.8.2000/755, 14§

Auvinen, P., Pukkala, T. & Vesa, L. 1997. Metsän kartoitus. Helsinki: Opetushallitus. Luettu 17.11.2020

Bailey, B. N. & Ochoa, M. H. 2018. Semi-direct tree reconstruction using terrestrial LiDAR point cloud data. Remote sensing of environment. Volume 208, huhtikuu 2018, s. 133-144. Verkkopalvelu. Luettu 7.3.2021. <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0034425718300191?via%3Dihub>

Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikennevirasto tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012. Helsinki. PDF. Luettu 12.12.2020 https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf

Eskola, R. & Peltoniemi, H. 2011. Viherympäristön mittaustekniikka ja paikkatieto. Helsinki: Viherympäristöliitto. Luettu 28.10.2020

Girardeau-Montaut, D. 2015. CloudCompare.org. Documentation. Wiki. Distance Computation. Verkkosivu. Julkaistu 17.2.2015. Luettu 7.1.2021. http://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Distances_Computation#Cloud-mesh_distances

Hirvensalo, V. n.d. Paikkaoppi.fi, Rasteri- ja vektorimuotoinen paikkatietoaineisto. Verkkosivu. Julkaistu n.d. Luettu 1.11.2020 <https://www.paikkaoppi.fi/fi/rasteri-ja-vektorimuotoinen-paikkatietoaineisto/>

Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5: 1–75. PDF. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42935/Laserkirja_painettu.pdf?sequence=2

Holopainen, M., Hyypä, J., Vastaranta, M. & Hyypä, H. 2011. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden julkaisuja 22: 3. PDF. https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjfe/2011/PJF2011_3_Holopainen_et_al.pdf

Holopainen M. 2019. Metsien kaukokartoitus – digitalisaatiota, täsmämetsätaloutta ja 4D-geoinformatiikkaa. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10214. PDF. Tieteen tori. 7 s. <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article10214.pdf>

Hyypä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M. & Puttonen, E. 2009. Yksittäisten puiden mittaus ja muutosten seuranta laserkeilauksella. Metsätieteen aikakauskirja. PDF. <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/533368/JHyyp%C3%A4.pdf?sequence=1>

Hyypä, J., Kelle, O., Lehikoinen, M., & Inkinen, M. 2001. 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. PDF. 39 (5), 969–975. Julkaistu 5/2001. Luettu 3.3.2021. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/921414/citations?tabFilter=papers>

Kaarna, P. 1984. Puutaulukoita. Teknisten Liitto TL ry. 1.p. Jyväskylä. Luettu 1.3.2021.

Kalkhan, M. A. 2011. Spatial statistics: geospatial information modeling and thematic mapping. Boca Raton. FL: CRC Press. Luettu 27.10.2020

Kalliovirta, J. & Tokola, T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39(2): 227–258. PDF. Julkaistu 18.5.2005 Luettu 13.2.2021 <https://www.silvafennica.fi/pdf/article386.pdf>

Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyyppä, J., Vaaja, M., Hyyppä, H., & Alho, P. 2013a. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75, 64–75. PDF. Julkaistu 7.12.2012 Luettu 11.2.2021 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.10.003>

Kankare, V., Niemi, M., Vastaranta, M., Holopainen & Hyyppä, J. 2015. Puustobiomassan kartoituksen ja seurannan kehittäminen. *Metsätieteen aikakauskirja*. No 1, artikkeli 6298. PDF. Julkaistu 13.5.2015. Luettu 7.1.2021 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6298.pdf>

Kankare, V., Rätty, M., Yu, X., Holopainen, M., Vastaranta, M., Kantola, T., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013b. Single tree biomass modelling using airborne laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 85, pp. 66-73. Artikkelii. PDF. Julkaistu 14.9.2013. Luettu 17.3.2021 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.08.008>

Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Alho, P., Viitala, R. 2013c. Retrieval of Forest Aboveground Biomass and Stem Volume with Airborne Scanning LiDAR. *Remote Sens.* 5, 2257-2274. Artikkelii. PDF. Julkaistu 13.5.2013 Luettu 18.3.2021 <https://doi.org/10.3390/rs5052257>

Kankare, V., Vauhkonen, J., Tanhuanpää, T., Holopainen, M., Vastaranta, M., Joensuu, M., Krooks, A., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Alho, P., & 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*, 97, 89–97. PDF. Julkaistu 16.9.2014 Luettu 12.2.2021 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.008>

Kangas, A., Päivinen R, Holopainen M & Maltamo M. 2011. Metsän mittaus ja kartoitus. 3. uud. p. Joensuu: Itä-Suomen yliopisto. Luettu 28.10.2020

Kukko, A., Kaartinen, H. & Hyyppä, J. 2019. Tulevaisuuden teknologiat: korkean erotuskyvyn laserkeilaus. Artikkelitiivistelmä. PDF. Julkaistu 4/2019 Luettu 20.3.2021 <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/308197/Positio4-2019KukkoKaartinenHyyppa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kuželka, K., Slavík, M. & Surový, P. 2020. Remote sensing. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. PDF. Julkaistu 13.4.2020. Luettu 15.12.2020. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/8/1236/pdf>

Laki viranomaisten toiminnan julkisuudesta 1.12.1999/621, 24§ 10k

Liang, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Pfeifer, N., Holopainen, M., Brolly, G., Francesco, P., Hackenberg, J., Huang, H., Jo, H-W., Kato, M., Liu, L., Mokroš, M., Morel, J., Olofsson, K., Poveda-Lopez, J., Trochta, J., Wang, D., Wang, J., Xi, Z., Yang, B., Zheng, G., Kankare, V., Luoma, V., Yu, X., Chen, L., Vastaranta, M., Saarinen, N. & Wang, Y. 2018. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 144, s. 137-179, PDF. Julkaistu 24.7.2018 Luettu 18.1.2021 <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0924271618301849?to-ken=2B8AAE0018D4E466985AE1FE6CC8C2B52D8BCE3531ACD80CB88E11F40DB2B6E490148C2B5D5F01491DF807512A257F5D>

Maanmittauslaitos (MML), Kartat ja paikkatieto – tuotekuvaukset. Verkkosivu. Julkaistu n.d. Luettu 2.11.2020 <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/laser-scanning-data-5-p>

Maltamo, M. & Laukkanen, S. 2001. Metsää kuvaavat mallit. Joensuu: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Luettu 21.12.2020

Olofsson, K., Holmgren, J. & Olsson, H. 2014. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. Remote Sensing. vol 6, no. 5. pp. 4323-44. Julkaistu 6.5.2014 Saatavilla ProQuest. Verkkopalvelu/PDF. Luettu 17.3.2021 <https://search-proquest.com.libproxy.tuni.fi/docview/1537367132?pq-origsite=primo>

Paikkatietoikkuna n.d. Verkkosivu. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/> (KUVAT X, Y)

Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P. & Chiteculo, V. 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery, International Journal of Remote Sensing, 38:8-10, 2392-2410. PDF. Julkaistu 5.12.2016. Luettu 28.3.2021. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1264028>

Picard, N. Saint-André, L. & Henry M. 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD). Montpellier. PDF. Julkaistu 8/2012. Luettu 25.2.2021 <http://www.fao.org/3/i3058e/i3058e.pdf>

Pukkala, T. 1988. Metsän kaukokartoituksen perusteet. 4. p. Joensuu: Joensuun yliopisto. Luettu 25.10.2020

- Repola, J. 2008. Biomass equations for birch in Finland. *Silva Fennica* vol. 42 no. 4 article 236. PDF. Luettu 19.11.2020 <https://www.silvafennica.fi/pdf/article236.pdf>
- Repola, J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. *Silva Fennica* vol. 43 no. 4 article 184. PDF. Luettu 19.11.2020 <https://www.silvafennica.fi/pdf/article184.pdf>
- Repola, J. 2010. Männyn ja kuusen biomassamallit Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja*. No. 1, artikkeli 6790. Tutkimusloste. PDF. Julkaistu 20.4.2010 Luettu 6.1.2021 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6790.pdf>
- Räty, M., Kankare, V., Yu, X., Holopainen, M., Vastaranta, M., Kantola, T., Hyyppä, J. & Viitala, R. 2011. Tree biomass estimation using ALS features. julkaisussa *SilviLaser 2011*, Sept. 16-20, 2011. Artikkel. PDF. Luettu 18.3.2021. Hobart, Australia. University of Tasmania, Hobart. https://www.researchgate.net/publication/228533770_Tree_biomass_estimation_using_ALS_features
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. & Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form – The pipe model theory. I. Basic analyses. *Japan. J. Ecol.* 14: 97–105 PDF. Julkaistu 24.2.1964 Luettu 19.11.2020. https://www.istage.ist.go.jp/article/seitai/14/3/14_KJ00001775191/pdf-char/ja
- Spellman, F. R. 2012. *Forest-based biomass energy: concepts and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press. Luettu 30.11.2020
- Taanila, A. 2020. Lineaariset regressiomallit. PDF. Julkaistu 28.9.2020. Luettu 30.3.2021. <https://taanila.fi/regressio.pdf>
- Tiilikainen, M., Vuorenvirta, K., Kutinlahti, P. & Vilén, K. 2019. Työ- ja elinkeinoministeriö, Puolustusministeriö. Maanpuolustuksen kansallisen osaamisohjan ja innovaatiokyvyn vahvistaminen. PDF. https://www.defmin.fi/files/4579/TEMrap_25_2019_Maanpuolustuksen_kansallinen_osaamisohja.pdf
- Tuominen, S. & Haapanen, R. 2014. Metsäbiomassan estimointi optimoidulla laserkeilaus- ja ilmakuva-aineistolla. *Metsätieteen aikakauskirja*. Numero 2, artikkeli 6906. Tutkimusloste. PDF. Julkaistu 8.7.2014 Luettu 7.1.2021 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6906.pdf>
- Tokola, T., Soimasuo, J., Turkia, A., Talkkari, A., Store, R. & Kangas, A. 1994. *Paikkatieto ja paikkatietojärjestelmä*. Joensuu: Joensuun yliopisto. Luettu 28.10.2020
- Tokola, T., Soimasuo, J., Turkia, A., Talkkari, A., Store, R. & Uuttera, J. 2000. *Metsät paikkatietojärjestelmissä*. Joensuu: Joensuun yliopisto. Luettu 28.10.2020

Vosselman, G. & Maas, H. (editoineet) 2010. Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, Dunbeath. Saatavilla: ProQuest Ebook Central. Verkkopalvelu/PDF. Julkaistu 2.1.2010. Luettu 6.1. 2021 <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=3417283>.

Zhang W, Qi J, Wan P, Wang H, Xie D, Wang X & Yan G. 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sensing. 8(6):501. Artikkel. PDF. Julkaistu 15.6.2016 Luettu 30.11.2020 <https://doi.org/10.3390/rs8060501>

Ärölä, E. 2018. Toim. (Rantala, S. & Korhonen, K. T.) Tapion taskukirja. 26. uudistettu painos. Helsinki: Metsäkustannus. Luettu 8.12.2020

LIITTEET

Liite 1. FARO-laserkeilaimen tuotekuvaus ja tekniset tiedot

FARO® Laser Scanner Focus^{3D} X 330

The Perfect Instrument for 3D Documentation and Land Surveying





- 

EXTENDED SCANNING - 330M RANGE
The Focus^{3D} X 330 can scan objects up to 330 meters away. Large buildings, land-site excavations and vast terrains can be surveyed with fewer scans, thus resulting in quicker project scanning completion.
- 

EASY POSITIONING - INTEGRATED GPS RECEIVER
With its integrated GPS receiver, the laser scanner is able to correlate individual scans in post-processing making it ideal for surveying based applications.
- 

OUTDOOR SCANNING CAPABILITY
The Focus^{3D} X 330 now is able to perform fast and highly precise scanning in direct sunlight.
- 

LOW NOISE PERFORMANCE
The new FARO Focus^{3D} X 330 delivers extraordinary scan data quality at extended range with very low noise.
- 

WIRELESS LAN
WLAN remote control permits you to start, stop, and view scans at a distance.

EXTENDED OUTDOOR SCANNING IN FULL SUNLIGHT

The new FARO Focus^{3D} X 330 a high-speed 3D scanner with extra-long range. The Focus^{3D} X advances into entirely new dimensions: it can scan objects up to 330 meters away even in direct sunlight.

With its integrated GPS receiver, the laser scanner is able to correlate individual scans in post-processing making it ideal for surveying based applications.

With its increased range and scan quality, the FARO Focus^{3D} X 330 considerably reduces the effort involved in measuring and post-processing. The 3D scan data can easily be imported into all commonly used software solutions for accident reconstruction, architecture, civil engineering, construction, forensics, industrial manufacturing and land surveying. Distance dimensions, area and volume calculations, analysis and inspection tasks and documentation can thus be carried out quickly, precisely and reliably.

BENEFITS

The new FARO Focus^{3D} X 330 is the leading tool for surveying and 3D documentation.

Scanning range - 330m, integrated GPS, the possibility to work in direct sunlight as well as the specially for the scanner designed protection cover make it a ideal tool for outdoor environments.

KUVA I. FARO-laserkeilaimen tuoteseloste Lähde: pdf.directindustry.com.

2021. Catalogs, Faro Europe, Tech sheet. Verkkosivu. PDF. Julkaistu 2021. Luettu 25.1.2021 <https://pdf.directindustry.com/pdf/faro-europe/tech-sheet-faro-laser-scanner-focus3d-x-330/21421-459177.html>

FARO® Laser Scanner Focus^{3D} X 330 FARO

www.faro.com

PERFORMANCE SPECIFICATIONS FOCUS^{3D} X 330

Ranging unit

Unambiguity interval: By 122 fill 488 Kpts/sec at 614m; by 976 Kpts/sec at 307m
 Range Focus^{3D} X 330: 0.6m - 330m indoor or outdoor with upright incidence to a 90% reflective surface
 Measurement speed (pts/sec): 122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000
 Ranging error¹: ±2mm

Ranging noise ²	@10m	@10m - noise compressed ³	@25m	@25m - noise compressed ³
@ 90% refl.	0.3mm	0.15mm	0.3mm	0.15mm
@ 10% refl.	0.4mm	0.2mm	0.5mm	0.25mm

Colour unit

Resolution: Up to 70 megapixel colour
 Dynamic colour feature: Automatic adaptation of brightness
 Parallax: Co-axial design

Deflection unit

Field of view (vertical/horizontal): 300°⁴ / 360°
 Step size (vertical/horizontal): 0.009° (40,960 3D-Pixel on 360°) / 0.009° (40,960 3D-Pixel on 360°)
 Max. vertical scan speed: 5.820rpm or 97Hz

Laser (optical transmitter)

Laser class: Laser class 1
 Wavelength: 1550nm
 Beam divergence: Typical 0.19mrad (0.011°) (1/e, halfangle)
 Beam diameter at exit: Typical 2.25mm (1/e)

Data handling and control

Data storage: SD, SDHC™, SDXC™; 32GB card included
 Scanner control: Via touchscreen display and WLAN
 New WLAN access: Remote control, scan visualisation are possible on mobile devices with Flash®

Multi-Sensor

Dual axis compensator: Levels each scan; Accuracy 0.015°; Range ± 5°
 Height sensor: Via an electronic barometer the height relative to a fixed point can be detected and added to a scan.
 Compass⁵: The electronic compass gives the scan an orientation. A calibration feature is included.
 GPS: Integrated GPS receiver



¹ Ranging error is defined as a systematic measurement error at around 10m and 25m, one sigma. Improved compensation available for dedicated mounting (fee-based service). ² Ranging noise is defined as a standard deviation of values about the best-fit plane for measurement speed of 122,000 points/sec.³ A noise-compression algorithm may be activated thereby compressing raw data noise by a factor of 2 or 4. ⁴ Ferromagnetic objects can disturb the earth magnetic field and lead to inaccurate measurements. ⁵ 2x150° Homogenous point spacing is not guaranteed. Subject to change without prior notice.

GENERAL

Power supply voltage: 19V (external supply)
 14.4V (internal battery)
 Power consumption: 40W and 80W
 (while battery charges)
 Battery life: 4.5 hours
 Ambient temperature: 5° - 40°C
 Humidity: Non-condensing

Cable connector: Located in scanner mount
 Weight: 5.2kg
 Size: 240 x 200 x 100mm
 Maintenance / calibration: Annual



Global Offices: Australia • Brazil • China • France • Germany
 India • Italy • Japan • Malaysia • Mexico • Netherlands
 Philippines • Poland • Portugal • Singapore • Spain • Switzerland
 Thailand • Turkey • United Kingdom • USA • Vietnam

www.faro.com
 Freecall 00 800 3276 7253
 info@faro.com



KUVA II. FARO-laserkeilaimen tuoteseloste Lähde: pdf.directindustry.com.
 2021. Catalogs, Faro Europe, Tech sheet. Verkkosivu. PDF. Julkaistu 2021. Lu-
 ettu 25.1.2021 <https://pdf.directindustry.com/pdf/faro-europe/tech-sheet-faro-la-ser-scanner-focus3d-x-330/21421-459177.html>

Liite 2. Maastomittaustapahtuman varuste- ja kalustoluettelo

TAULUKKO I.

Varautuminen/käyttökohde	Artikkeli*
korkeat tarkkuusvaatimukset täyttävä laserkeilauskalusto	<i>FARO Focus 3D X 330 -maalaserkeilain oheislaitteineen</i>
useiden pistepilvien yhdistämiseksi tarvittavat referenssipisteet; tähykset	<i>Pallotähykset (sphere)</i>
Tähysten sijoitteluun metsäisessä ympäristössä vaadittavat jalustat/telineet	<i>Kolmijalkoja/esim. puiden runkoihin kiinnitettäviä alustoja</i>
kulmien- ja etäisyydenmittauskoje	<i>takymetrikalusto</i>
Perinteiseen maastomittaustapahtumaan varautuminen	
Pohjapinta-alan mittaus	<i>relaskooppi</i>
puun pituuden (h) määrittäminen	<i>Suunto hypsometri</i>
puun rinnankorkeusläpimitan (d _{1.3}) määrittäminen	<i>Hultafors talmeter</i>
kulmanmittaus ja suunnanmäärittäminen (koealan rajaus)	<i>Suunto bussoli</i>
etäisyydenmittaus	<i>Spencer 15–20 m metsurinmitta</i>
osallistujakunnan perehdytys	<i>karttatulosteet (säänkestävää materiaalia)</i>
Lisäksi hyvä olla mukana: ensiaputarvikkeita, heijastavaa kuitunauhaa, keinovalonlähde	
*Tässä dokumentissa esitettyjen mittalaitteiden merkit ja mallit ovat esimerkkejä.	

Liite 3. Metsäalueen inventoinnin suunnittelu

TAULUKKO II. (Kangas ym. 2011, 169, muokattu)

Suunnittelun vaihe	Huomioitavat seikat
1. Tietotarveanalyysi	<ul style="list-style-type: none"> • tiedon käyttäjät ja tietojen käyttötarkoitukset • mitä tietoja tarvitaan ja kuinka pienille osaluueille • luotettavuusvaatimukset
2. Mitä tietoja on jo olemassa?	<ul style="list-style-type: none"> • kartat, ilmakuvat ja satelliittikuvat • vanhat inventointitiedot • tutkimustulokset, olemassa olevat mallit ja taulukot
3. Resurssit	<ul style="list-style-type: none"> • rahat ja laitteet • työvoima ja sen laatu (kompetenssi) • infrastruktuuri
4. Otantamenetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • otantayksiköt • ositteluperusteet/käytettävissä oleva aputieto • tietolähteiden yhdistämisen mahdollisuus
5. Mittausmenetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • maastomittaukset • kartta- ja kaukokartoitustiedon tulkinta • mittausten luotettavuuden tarkistus
6. Laskentamenetelmä	<ul style="list-style-type: none"> • käytettävät tietokoneet • estimaattorit, mallit • digitaalisen tiedon tulkinta-algoritmit • luotettavuuslaskelmat
7. Tulosten esittämistapa	<ul style="list-style-type: none"> • taulukot ja piirrokset • teemakartat ja kuviokartat • digitaalinen tulospalvelu

Liite 4. Mittaustapahtuman kartoitus

TAULUKKO III. (Eskola & Peltoniemi 2011, 48, muokattu)

Mittaustapahtuman kartoitus			
<i>Mitä mitataan</i>	<i>Lähtötiedot</i>	<i>Toiminta paikan päällä</i>	<i>Miten mitataan</i>
Mittauksen tarkoitus	kartat, asemapiirros, jne.	kiintopisteet, rajat, jne.	kohteen laajuus (välinevalinta) ja tarkkuusvaatimukset (välinevalinta)
Mittauksen kohteena on metsikkö maalaserkeilaimella, ja puuston perustukset perinteisin maastomittausvälinein mitattuna biomassan määrittämiseksi.	Lähtötietona on kohteen alustava sijainti; yksi koordinaattipari (x,y) = avoimen metsävaratiedon pohjalta tuotetut lähtötiedot kohteella valitsevista ominaispiirteistä.	Mitattava alue voidaan rajata maastoon heijastavalla kuitunauhalla. Alue voidaan rajata suoraan kulmaiseen muotoon, jotta koalojen sijoittaminen helpottuu.	Maalaserkeilaimen asetukset säädetään riittävään tarkkuuteen (objektiivinen mittaus). Puustotunnusten mittaus tapahtuu subjektiivisesti perinteisten maastomittausvälineiden avulla.
Lisähuomioita			
<p>a) Siirtyminen ja saapuminen kohteelle: lopullinen toimintasuunnitelma voidaan toteuttaa vasta kentällä.</p> <p>b) Mittaajien roolitus toiminnan tehostamiseksi.</p> <p>c) Henkilökohtainen huolto päivän aikana: varustus sään mukaan, suu-nenäsuojain (COVID-19), huomioliivit, kenttärुokailu.</p> <p>d) Mittauspaikalle tai sen välittömään läheisyyteen ei jätetä mitään jälkiä.</p>			

Liite 5. AARNE 1. lähtötiedot

TAULUKKO IV.

"AARNE 1"		
sijainti (koordinaatit)	anonymisoitu	ETRS-TM35FIN
osoitetiedot	anonymisoitu	Etelä-Suomi (eteläboreaalinen vyöhyke)
puustotunnuksia		
pääpuulaji	mänty (<i>pinus sylvestris</i>)	visuaalisesti kuvatulkittu
keskiläpimitta	24,8 cm	hilatieto
keskipituus	19,4 m	hilatieto
latvusmalli (CHM*)	25 m	visuaalisesti kuvatulkittu
pohjapinta-ala	22 m ²	hilatieto
kehitysluokka**	04 – Uudistuskypsä metsikkö	hilatieto
kasvupaikkatyyppi	tuore kangas***	hilatieto
pinta-ala	n. 1 ha	suunniteltu
kohteen muut huomiot		
maastoprofiili	ei merkittäviä korkeuseroja	8 m vaihteluväli 100 m matkalla
*Canopy Height Model on puuston pituutta kuvaava malli, jonka ruutukoko on 1 m x 1 m.		
**Kehitysluokka kuvaa puuston metsänhoidollista ja puuntuotannollista kehitysvaihetta tietyllä hetkellä ja määräytyy puuston iän, rakenteen ja aiemman metsänkäsittelyn perustella.		
***Kivennäismaiden viljavuudeltaan vastaava kasvupaikkatyyppi kasvillisuusvyöhykkeittäin (Etelä-Suomi).		

Avoimesta metsävaratiedosta tuotettujen hilatietojen kohdalla on menetelty seuraavasti:

1. Tarkastelualue on rajattu kartalle tarkoin **koordinaattiparein** (4 kpl).
2. Kaikki **hilaruudut**, jotka osuvat yli 50 % osuudelta tarkastelualueelle, sisällytetään laskelmiin.
3. Mikäli hilaruudun tieto on skaalattu, esim. 21 m – 24 m → käytetään pienimmän ja suurimman arvon keskiarvoa.
4. Mahdolliset tyhjät hilaruudut (puuttuva tieto) on jätetty keskiarvoyhtälöistä pois.
5. Voidaan pitää todennäköisenä, että keskipituus ja keskiläpimitta sisältävät suurta virhettä, sillä valtaosa hilaruuduista sisälsi nk. maksimiarvon.

Liite 6. Lineaaristen regressiomallien varianssianalyyseiden tulokset

TAULUKKO V. TLS aineiston osalta mallinnetun biomassan tilastolliset tunnusluvut

TLS YHTEENVETO TULOSTUS BIOMASSA						
<i>Regressiotunnusluvut</i>						
Kerroin R		0.972				
Selityskerroin*		0.944				
Tarkistettu korrelaatiokerroin		0.943				
Keskivirhe		2.547				
Havainnot		109				
ANOVA						
	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>	
Regressio	1	11692.74706	11692.74706	1802.169172	8.81815E-69	
Jäännös	107	694.2322367	6.488151745			
Yhteensä	108	12386.9793				
	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>t Tunnusluvut</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Alin 95%</i>	<i>Ylin 95%</i>
Leikkauspiste	13.8038378	0.746010201	18.50355099	3.99E-35	12.32495958	15.28271601
Bmass (kg)	0.046505314	0.001095481	42.45196311	8.81815E-69	0.044333651	0.048676977

TAULUKKO VI. ALS aineiston osalta mallinnetun biomassan tilastolliset tunnusluvut

ALS YHTEENVETO TULOSTUS BIOMASSA						
<i>Regressiotunnusluvut</i>						
Kerroin R		0.9552				
Selityskerroin*		0.9123				
Tarkistettu korrelaatiokerroin		0.9115				
Keskivirhe		2.2787				
Havainnot		103				
ANOVA						
	<i>va</i>	<i>NS</i>	<i>KN</i>	<i>F</i>	<i>F:n tarkkuus</i>	
Regressio	1	5457.364493	5457.364493	1051.04123	3.40658E-55	
Jäännös	101	524.4264432	5.192341022			
Yhteensä	102	5981.790936				
	<i>Kertoimet</i>	<i>Keskivirhe</i>	<i>t Tunnusluvut</i>	<i>P-arvo</i>	<i>Alin 95%</i>	<i>Ylin 95%</i>
Leikkauspiste	17.44655632	0.89110954	19.5784643	3.69486E-36	15.6788347	19.21427794
Bmass (kg)	0.041573181	0.001282341	32.41976603	3.40658E-55	0.039029362	0.044117

**"Excelin suomenkielisessä versiossa on virhe: selityskerrointa kutsutaan virheellisesti korrelaatiokerroimeksi (Taanila 2020, 8)." Korrelaatiokerroin termi, on korjattu esitetyissä taulukoissa selityskertoimeksi.