

**PUUSTON SIJAINNITARKKUUS METSÄKESKUKSEN  
PUUKARTTAKOEALOILLA**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Evo, metsätalous

Syksy 2022

Tero Luopa

---

Tutkimuksen tärkein tavoite oli tuottaa Metsäkeskukselle mitattua tietoa puukarttakoealoilla käytettävän mittalaitteen sijaintipaikkannuksen tarkkuudesta laitteen hankintapäätöstä varten. Opinnäytetyössä perehdyttiin myös kaukokartoitusperusteisen metsävaratiedon muodostamiseen ja sen menetelmiin.

Hankintapäätöksen tekemiseen edellytettiin laskettua sijaintitarkkuutta mitattaville puille. Mitattavia tunnuksia olivat koealatasolla keskineliövirhe (RMSE) ja harha (BIAS).

Sijaintitarkkuuden mittaamiseen valikoitui kuusi Hämeenlinnan Evolla olevaa tarkkaan tutkittua erityyppistä koealaa, joista myöhemmin yksi valikoitui pois laskennasta. Näiltä koealoilta on (TLS) maastolaserin pistepilviin perustuvat puukartat. Koealojen puuston sijaintimittaukset perustuvat tarkkoihin RTK-GPS tietoihin. Koealan puiden sijainteja voitiin täten pitää tutkimuksessa oletettuina.

Maastomittaukset suoritettiin Evolla syksyllä 2021, sekä tämän jälkeen laskettiin mittaustulokset. Tulokset osoittavat mittalaitteen tuottavan hyvää sijaintipaikkannusta harvapuustoisissa metsissä, joita puukarttamittauksissa yleisesti käytetään. Tiheissä puustoissa mittalaite kykenee tuottamaan melko tasaista tulosta. Suurimmat poikkeamat sijainnista johtuivat useimmiten vertailuaineiston mahdollisesta epätarkkuudesta. Tutkimuksen loppuvaiheessa selvisi, että vertailuaineistossa on vähäisiä määriä TLS pistepilvessä katveeseen jääneitä puita, joille on mitattu miestyönä maastossa sijainteja. Tästä johtuen vertailuaineistossa katveeseen jääneiden puiden osalta sijainneissa saattaa olla hieman mittaajasta johtuvaa epävarmuutta. Katveeseen jääneiden puiden osalta on havaittavissa tuloksissa suurimmat virheet.

Tutkimusta on suoritettu vain niiltä osin, mitä Metsäkeskus tarvitsi hankintapäätöstään varten, joten tutkimukseen jää vielä tilaa tarkemmille analyyseille.

Degree Programme in Forestry

Author Tero Luopa

Subject Tree Location Accuracy in Forest Centre Wood Map Plots

Supervisors Esa Lientola and Risto Viitala

Abstract

Year 2022

---

The main objective of the study was to produce measured data for The Finnish Forest Centre on the accuracy of the positioning of the measuring instrument used in wood map plots for the purchase decision of the device. The thesis also explores the formation of remote sensing-based forest reserve data and its methods.

Calculated location accuracy for the trees to be measured was required to make a procurement decision. The identifiers to be measured were intermediate bio-error (RMSE) and bias (BIAS) at the probate level, which were also summed up from all plots.

Six carefully studied plots of in Evo, Hämeenlinna were selected to measure location accuracy, one of which was subsequently selected out of the calculation. There are wood maps based on point clouds of (TLS) terrain laser, with location measurements based on RTK-GPS data with accuracy of centimeter of class. Because of this, the locations were assumed in the study.

Terrain measurements were carried out at in Evo in autumn of 2021, followed by the calculation of measurement results. The results show that the measuring instrument provides good positioning in the sparsely wooded forests commonly used in tree map measurement. The results show that the measuring device is capable of producing a fairly uniform result even in dense wood clusters. The greatest deviations from location were most often due to possible inaccuracy in the reference dataset. In the final stages of the study, it was discovered that the reference data contains small quantities of trees left in the shade spot in the TLS point cloud. Terrain locations have been measured for these trees by hand. Due to this, there may be some uncertainty due to the measurement of the location of the trees that have been snapped. In the case of trees left behind, the greatest errors are noted in the results.

The research has only been carried out based on what The Finnish Forest Centre needed for its procurement decision, so further, more detailed, analysis needed.

Keywords Tree map plot, forest reserve data, remote sounding, laser scanning

Pages 61 pages

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Metsävaratieto .....	2
2.1	Kaukokartoitus .....	4
2.1.1	Kaukokartoitusperusteisen metsävaratiedon laatu.....	4
2.1.2	Kaukokartoituksella tuotetun metsävaratiedon kehitys .....	7
2.2	Maastomittaukset .....	9
2.2.1	Kiinteäsäteinen ympyräkoeala .....	9
2.2.2	Puukarttakoeala .....	10
2.3	Metsävaratiedon ajantasaistus .....	14
3	Laserkeilaus .....	15
3.1	Lentolaserkeilaus, ALS.....	16
3.2	Liikkuva laserkeilain, MLS.....	21
3.3	Maalaserkeilain, TLS.....	22
3.4	Maastolaserin (TLS) käyttö Evon koealoilla .....	24
4	Puukarttakoealan mittausvälineet .....	28
4.1	Mittasakset.....	29
4.2	GNSS-Paikannin.....	30
4.3	Pseudoliitit ja TerraHärp-sovellus .....	32
4.4	Paikannustarkkuus TerraHärpillä .....	34
4.5	Korkeusmittari.....	34
5	Aineiston käsittely .....	35
5.1	RMSE ja RMSEP .....	36
5.2	BIAS .....	37
6	Mittaustulokset .....	38
6.1	Koeala 1015 – Rämemännikkö.....	40
6.2	Koeala 1041 – Sekapuusto .....	41
6.3	Koeala 1123 – Järeitä puita, alikasvoksella .....	42
6.4	Koeala 2028 – Korpikuusikko .....	44
6.5	Koeala 2033 – Männikkö.....	46

6.6	Koeala 2092 – Kuusikko .....	48
7	Johtopäätökset ja pohdinta.....	49
	Lähteet.....	53

## 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä pureudutaan puuston sijaintitarkkuuteen Metsäkeskuksen puukarttakoealoilla. Tutkimuksen tarve lähti Metsäkeskukselta, jolla oli puiden tarkan sijainnin mittaavan laitteen hankinta käynnissä. Mittalaitteen tulkitsemasta puiden sijaintitarkkuudesta Metsäkeskus tarvitsi mitattua tietoa keskineliövirheen (RMSE) ja harhan (BIAS) osalta. Mittalaite mahdollistaa entistä tarkempaa puustotulkintaa kaukokartoitetun metsävaratiedon tueksi.

Puukarttakoealoja käytetään tarkentamaan laserkeilauksen ja ilmakuvausten tuottamaa aineistoa, jota kertyy metsistä vuosittain jopa 4 miljoonaa hehtaaria. Kaukokartoitetun laseraineiston pistetiheys on kymmenkertaistunut vuodesta 2020 lähtien.

Puukarttakoealoilla tarkennetaan puustotulkinnan laskentamalleja, jossa piirteiden avulla voidaan tuottaa tarkempia puustotietoja hilaruudulle ja latvusrajatulle puuryhmälle, joka on teräväpiirteisempi inventointiyksikkö. Kaukokartoitetulta metsävaratiedolta odotetaan paljon ja kattavasti tietoa metsistä, jota se toki myös antaa.

Tutkimukset suoritettiin Evolla syksyllä 2021 ja tutkimuksia varten valikoitiin kuusi koealaa erityyppisistä metsistä. Koealoiksi valikoitui myös sellaisia metsiköitä, joista ei normaalisti mitattaisi puukarttakoealaa, puuston tiheän rakenteen takia. Tutkimuksen pohja-aineistona käytetyt koealat ovat aiemmin (TLS) maalaserilla mitattuja, joissa voitiin pitää puiden sijainteja absoluuttisina. Mittaukset suoritettiin puukarttakoealamittauksena tavanomaiseen tapaan parityöskentelynä. Koealoilla käytiin kullakin neljä kertaa eri ajankohtina mittaamassa puuston sijainti. Mittaustulokset lähetettiin tulkitsijalle, jolta paluu vastauksena saatiin mitatut puustotiedot ja koordinaattimuunnos paikallisesta koordinaatistosta Euref-fi-koordinaatistoon, joka mahdollisti aineistojen vertailun GIS paikkatieto-ohjelmalla.

Opinnäytetyössä perehdytetään lukijaa kaukokartoituksen menetelmiin ja tutkimuksen pohja-aineistona käytetyn TLS maastolaserin tarkkuuteen sekä käydään kattavasti läpi Metsäkeskuksen puukarttakoealoilla käytettävä mittalaitteisto ja sen sijaintitarkkuus erilaisissa metsiköissä. Loppuluvussa on lisäksi nidottu keskeisimpiä havaintoja ja mittaustarkkuuden virheisiin vaikuttaneita tekijöitä.

## 2 Metsävaratieto

Suomen metsävarat tunnetaan kansainvälisesti verraten erittäin hyvin, sillä Suomen metsistä on kerätty valtakunnan metsien inventointiohjelmien myötä kattavaa ja luotettavaa tietoa jo 1920-luvulta lähtien. Valtakunnan metsien inventoinnin tuloksia hyödynnetään muun muassa metsävarojen seurannassa. (MMM, n.d.)

Suomen metsäkeskus kerää metsävaratietoa laserkeilaukseen ja ilmakuvaukseen perustuvalla kaukokartoitusmenetelmällä, sekä maastossa tehtäviä kiinteäsäteisiä- ja puukarttakoealoja inventoimalla. Kerätyt tiedot pidetään ajan tasalla kasvunlaskennan ja toimenpiteistä saadun toteutustiedon avulla. Metsävaratiedot ovat avoimesti kaikkien saatavilla, joten niitä voivat hyödyntää niin metsänomistajat kuin toimijat. Metsävaratietoja hyödynnetään metsäomaisuuden hoidossa ja käytön suunnittelussa esimerkiksi Metsään.fi-palvelun kautta. Suomen metsäkeskus hyödyntää keräämiään metsävaratietoja metsälakien valvonnassa ja metsänomistajien neuvonnassa. (MMM, n.d.)

Suomen metsien kattava laserkeilaus sykli on kuusi vuotta ja ilmakuvaukset tehdään kolmen vuoden välein. Pohjoisimmassa Lapissa kuvaus sykli on puolet hitaampi. Kuvaukset ovat ennalta suunnitellun ohjelman mukaisia, jotka ovat 300 000 hehtaarin kokoisia alueita, joista metsää yleensä yli puolet. Alueita on yhteensä vuosittain noin 22 (Kuva 1), joista inventoitavaa metsää kertyy 3,5–4 miljoonaa hehtaaria. (Metsäkeskus, n.d.)

Kuva 1. Suunnitelma laserkeilauksesta vuodelle 2022 (MML, n.d.-a)



Kansallisessa laserkeilausohjelmassa 2020–2025 on lisätty keilaimen tuottamaa tarkkuutta. Aiemmin, vuosina 2008–2019 käytettiin pistetiheytenä 0,5 pistettä neliömetrille. Tällä hetkellä pistetiheytenä on vähintään 5 pistettä neliömetrillä, joka kymmenkertaistaa jo laadukasta kuvaa. Tällöin maasta heijastuvien pisteiden etäisyys toisistaan on 0,4 metriä. Korkeustarkkuuden keskivirhe on enintään 10 senttimetriä ja tasotarkkuuden keskivirhe enintään 45 senttimetriä yksiselitteisillä kohteilla. (MML, n.d.-b)

Metsävaratiedon keruussa saadaankin laserkeilauksella tehokkaasti tarkkaa ja kolmiulotteista tietoa puuston ja maaston rakenteesta. Laserkeilaukset tehdään 1,5–2



kilometrin korkeudesta. Lisäksi hyödynnetään ilmakuvia esimerkiksi puulajien tunnistamisessa. Ilmakuvat otetaan 7–8 kilometrin korkeudesta ja niiden maastotarkkuus on 40 cm. (Metsäkeskus, n.d.)

Kaukokartoitusperusteinen metsävaratiedon keruu sekä tietojen käsittely kestää vuoden. Keväällä ja kesällä tehdään ilmakuvauus ja laserkeilaus sekä maasto mittaukset koealoilla. Mittauksia on oltava erityyppisistä metsistä puustotulkinnan mallinnusta varten. Syksyllä esikäsitellään tarvittavat aineistot ja talvella laaditaan tilastolliset laskentamallit, joita verrataan maastossa mitattuun tietoon. Näillä varmistetaan tulosten riittävä laatu ja tarkkuus ennen metsävatiedon julkistamista toisena keväänä. Puustotieto on jaettu koko maan alueelle 16\*16 metrin hilaruuduissa. Toisena vastaavan kokoista inventointiyksikköä käytetään nykyisin latvusrajattua puuryhmää, joita yhdistelemällä tuotetaan metsikkökuvion puustotieto. (Metsäkeskus, n.d.)

## **2.1 Kaukokartoitus**

Kaukokartoituksella yleensä tarkoitetaan ilmasta käsin tapahtuvaa havainnointia, jossa ei tapahdu fyysistä kontaktia tutkittavaan kohteeseen. Englanninkielinen termi remote sensing, ”etäaistiminen” kuvaa asiaa ehkä paremmin. Tämän kaltainen etäaistiminen perustuu sähkömagneettisen säteilyn havainnointiin, joka tehdään nimenomaan lentävillä aluksilla kuten lentokone, helikopteri, drone ja satelliitti. Sähkömagneettista säteilyä syntyy kaikista kappaleista, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nolapisteen(-273°C). Jokainen kappale heijastaa ja lähettää sähkömagneettista säteilyä, joten kaukokartoituksen avulla voidaan havainnoida myös sellaisilla aallonpituuksilla, joita ihmissilmällä ei voi nähdä. Passiivisia eli kappaleen itsensä tuottamaan säteilyyn perustuvia havaintoja tehdään tyypillisesti erilaisilla kameroilla, radio- ja spektrometreillä. Aktiivisia eli kappaleeseen lähetettäviä säteily havaintoja tehdään laserkeilaimilla ja erilaisilla tutkilla. (Holopainen ym., 2015, s. 34)

### **2.1.1 Kaukokartoitusperusteisen metsävaratiedon laatu**

Metsäkeskus kerää kaukokartoitusperusteisesti metsävaratietoa, joka perustuu lentokoneesta tehtävään laserkeilaukseen ja ilmakuvaukseen, maastossa tapahtuviin

referenssikoealojen mittaukseen sekä näiden aineistojen yhteensovittamisen perusteella tehtävään puustotulkintaan. Metsävaratiedossa käytetään edelleen jonkin verran maastoarviolla kerättyä tietoa. Nämä kohteet ovat pääosin taimikoita. Lisäksi aiemmista tiedoista poimitaan maaperä- ja kasvupaikka tietoja, joita on hankala saada luotettavasti kaukokartoittamalla. (Metsäkeskus, 2021, ss. 4, 5)

Inventointiyksikkönä käytetty 16\*16 hilaruutu on hieman rajaava yksikkö, koska siinä saattaa leikkautua puustosta latva pois sekä syntyä niin sanottua reunahila ongelmaa, jossa hila ruutu on osin eri kuviolla. Uutena inventointiyksikkönä on latvusrajattu puuryhmä, jossa rajaukset menevät puiden välistä ja täten on tarkkapiirteisempi. Latvusrajattuja puuryhmiä yhdistelemällä saadaan muodostettua metsikkökuvion puustotieto. Vastaavasti yhdistelemällä hilaruutuja muodostetaan kuviotieto. (Metsäkeskus, 2021, s. 6)

Metsäkeskuksen kuviokohtainen tavoitetarkkuus kokonaispuuston osalta on pohjapinta- alalle  $\pm 3 \text{ m}^2/\text{ha}$  (20 %), keskiläpimitalle  $\pm 3 \text{ cm}$  (15 %), keskipituudelle  $\pm 2 \text{ m}$  (10 %) ja keskitilavuudelle  $\pm 20 \%$  kahdeksassa tapauksessa kymmenestä kehitysluokaltaan nuorissa ja varttuneissa kasvatusmetsissä sekä uudistuskypsissä metsissä. Kuviokohtaisessa tarkastelussa tarkkuus paranee suuremmilla kuvioilla, koska tietoja yleistettäessä virheet yleensä kumoavat jonkin verran toisiaan. Puustotulkinnan inventointiyksiköille ei ole määritelty erillisiä tarkkuustavoitteita, koska käytettävä aluepohjainen menetelmä on kehitetty ja soveltuu parhaiten kuviotason tiedon tuotantoon. Kokonaispuuston tarkkuus on kaukokartoitusperusteisella menetelmällä yleensä parempi ja tasalaatuisempi kuin kuviokohtaisella maastoarvioinnilla, joka on riippuvainen inventoijasta. Laserinventoinnissa on se hyvä puoli, että puustotulkinta on objektiivinen ja kattaa koko kuvion, kun taas maastossa otetaan muutama, subjektiivisesti valittu relaskoopikoeala. Maastoarvioinnin virhe on 15–20 prosentin luokkaa, jota on pidetty riittävän tarkkana metsäsuunnitteluun. (Metsäkeskus, 2021, s. 6.; Heikkilä, 2022)

Mittausten perusteella kaukokartoituksen tarkkuus on kasvatus- ja uudistuskypsien metsien osalta riittävän tarkkaa puunhankinnan tarpeisiin. Kokonaistilavuuden, pohjapinta-alan ja rinnankorkeusläpimitan keskimääräinen virhe on noin 10 % ja pituuden virhe 5 % luokkaa.

Pääpuulaji on 95 prosenttisesti oikein kuviotasolla, mutta puulajitunnuksissa on vielä virhettä. Puulajitunnusten osalta on odotettavissa selvää parannusta. (Heikkilä, 2022)

Epätasaisissa-, monijaksoisissa metsissä ja ohjeellista minimikokoa pienemmissä sekä muuten poikkeavissa kuvioissa voi esiintyä tarkkuuskriteerejä suurempia virheitä. Erityisesti puulajisuhteissa virhettä syntyy sivupuulajien osalta (esim. kuviolla on arvioitu olevan puulajia, jota siellä ei todellisuudessa ole). Metsäkeskuksen minimitavoite on, että pääpuulaji olisi määritelty oikein, jos kuviolla sellainen selkeästi on. (Metsäkeskus, 2021, s. 7)

Veikko Maaninka on tuonut aiemmin opinnäytetyössään esille Juho Heikkilän esitystä Metsäkeskuksen tutkimuksesta vuodelta 2019 (Taulukko 1). Metsäkeskuksessa puulajikohtaiset keskivirheet osoittautuvat hyvin selkeästi. Tutkimuksessa oli ollut tarkasteltavana noin 600 kuviota kahden vuoden ajanjakson aikana. (Maaninka, 2021, s. 9)

Taulukko 1. Mikrokuviotason kahden vuoden keskivirheprosentit. (Maaninka,2021; Heikkilä2019)

	V	PPA	D	H	Ikä
Kokonaispuusto	11	12	10	5	23
Mänty	31	30	17	10	27
Kuusi	43	41	31	27	33
Koivu	41	41	29	18	30

Puuston ikä on kaukokartoituksessa vaikea tunnus ja sille ei ole määritetty tarkkuus kriteeriä. Tarkastelujen perusteella puustotulkinnassa kasvatettavien- ja uudistuskypsienmetsien ikä on osoittautunut haarukkaan  $\pm 25 \%$  kahdeksassa tapauksessa kymmenestä. (Metsäkeskus, 2021, s. 7)

Mitä pienempään puustoon mennään, sen haastavampaa on kaukokartoitus.

Kaukokartoituksella ei saada luotettavaa tietoa alle 2 metrin taimikoille. Laatutavoitteena onkin, että taimikoiden runkoluku on oikein 50 %:n tarkkuudella. Myöskään varttuneemmissa taimikoissa puustotulkinnan tarkkuus ei vastaa laatukriteerejä. Pituus on

luotettavin tunnus myös taimikoissa ja pääpuulaji yleensä oikein, mutta hoitamattomat havupuutaimikot saatetaan tulkita lehtipuustoksi. Myös etenkin runkoluvun osalta syntyy virheitä. (Metsäkeskus, 2021, s. 8)

### **2.1.2 Kaukokartoituksella tuotetun metsävaratiedon kehitys**

Kehitystyötä tehdään metsävaratiedon ympärillä jatkuvasti. Kehitystyöllä pyritään tarkentamaan metsikkötason tietoja sekä saamaan kattavampaa tietoa arvokkaista metsäelinympäristöistä.

Laskennoissa on otettu käyttöön uudet kasvumallit ja kehitetty puulajiosuuksien mukaan dynaamiset toimenpidesimulointimallit, jotka parantavat hakkuuehdotusten ajoitusta. Puulajitulkinnan parantuessa on mahdollista tarkentaa puutavaralaji arviota tukki- ja kuitupuun osalta. Kuviointi kehittyy ja nykyisin saadaan jo hakkuukoneilta ajantasaista tietoa kuvion rajauksesta, hakkuutavasta ja ajankohdasta. Hakkuukoneilta välitetään, metsänomistajan suostumuksella sellaisia tietoja, joihin hän antaa suostumuksensa. Hakkuun kertymätiedot ovat sellaisia, joita ei välitetä. Kehitteillä on myös kuviokohtaisen laatuindeksin laskenta, jolla voidaan kuvata perustunnusten paikkansapitävyyttä eli onko niitä syytä käydä maastossa tarkistamassa. Kasvupaikkaluokkaa voidaan arvioida paremmin toisella kierroksella, sillä kahden eri ajankohdan laserilta tulkitun kasvun sekä ravinteisuutta ja puuntuottokykyä kuvaavan pituusbonitoinnin avulla. Tällä on merkitystä puuston kasvun laskennassa sekä tavoite korjata mahdollisia virheitä olemassa olevasta tiedosta. Tavoitteena on myös kehittää ja testata hiilitaselaskentamalleja. (Heikkilä, 2022)

Kehittämistyötä tehdään jatkuvasti myös luontotietoon liittyen. Saadaanko laserkeilauksella, ilmakuvausella sekä eri paikkatietoaineistoja yhdistämällä parempaa ja kattavampaa tietoa esimerkiksi arvokkaista metsäelinympäristöistä? Miten kaukokartoituksella saadaan tietoa metsien monimuotoisuutta lisäävistä tekijöistä, kuten lehtipuulajit, kuollut puusto, metsän kerroksellisuus tai säästöpuuryhmät? Tietoa maaperästä ja metsistä tarvitaan myös vesiensuojelussa. Yhtenä kehittämiskohteena on metsätuhojen kartoitus, jossa olisi mahdollista käyttää hakkuukoneelta tullutta tietoa esimerkiksi kuusentyvilahon esiintymisen

osalta. Tästä saadaan selville tyvilahon levinneisyys sekä voidaan muodostaa riskikarttoja tuhon leviämisestä. (Heikkilä, 2022; Metsäkeskus, 2022)

Hakkuukoneen ja kuormatraktorin hyödyntämistä on tutkittu puunkorjuussa. Tavoitteena on, että jo korjuutyön aikana saataisiin mitattua korjuutyön laatu sekä päivitettyä metsävaratieto. Tarkasti mitatusta puustosta voitaisiin ennustaa puuston tuleva kehitys ja seuraavan toimenpiteen ajankohta. Mitatuilla puustotunnuksilla saataisiin muokattua malleja puuston runkomuodosta ja kasvun kehityksestä ilmaston lämmetessä. Näillä tuotettaisiin melkoisesti säästöjä, sillä useimmat tunnuksot ovat olleet vain manuaalisesti mitattavissa tähän asti. Korjuutyön aikana saatavia tunnuksia olisi urapainumien mittaamiset, ajouravälit ja -leveydet, puustotunnuksot sekä puustovauriot. Metsätehon raportissa tutkimuksen tuloksena on, että tämä kaikki on mahdollista suorittaa hakkuun aikana. Ongelmaksi muodostuu tällä hetkellä herkäät mittalaitteet vaativissa metsäolosuhteissa. Suurin osa mitattavista tunnuksista voidaan kyllä havaita tai estimoida koneiden nykyisistä sensoreista riittävällä tarkkuudella. (Ovaskainen, 2019)

Ponsse on kehittänyt jo viisi vuotta laserkeilaimeen perustuvaa järjestelmää koneissaan. Järjestelmän olisi tarkoitus avustaa kuljettajaa harvennustiheyden saavuttamisessa. Toistaiseksi järjestelmää ei ole otettu vielä tuotannossa käyttöön. (Metsälehti, 2022)

Yliopistotutkija Ville Kankare kertoo Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021), että yliopiston laserkeilauksen huippuyksikön olleen yhteistyössä Ponssen kanssa kehittämässä hakkuukoneeseen liitettävää laserkeilain järjestelmää. Tuotekehityksessä on ollut myös peliteollisuus mukana havainnollistamassa ohjaamoon lisättyä todellisuutta. Hakkuukoneessa olevan laitteiston kustannukset on Kankareen mukaan pyrittävä optimoimaan tarpeeseen sopiviksi. Metsästä kerättävän datan ollessa harvempaa on sitä huomattavasti helpompaa prosessoida, jolloin lähiympäristöstä kerätään vain sellainen data, josta ollaan kiinnostuneita. Kankare kertoo, että kerätyn datan prosessointi kannattaa suorittaa heti hakkuukoneessa, josta ei lähetetä laserkeilauksen tuottamaa pistepilveä enää mihinkään. Paikannuksessakin päästään hänen mukaansa jo puolen metrin sijaintitarkkuuteen yksittäisen puun osalta. Kankare uskoo tekniikan ottavan vielä suuria harppauksia lähivuosina, erityisesti autoteollisuuden kehityksen myötä, jolloin

laitteistoista saadaan pieniä, mahdollistaen niiden hyvän sijoittelun hakkuukoneisiin. Kankareen mielestä ongelmaksi voi tulevaisuudessa muodostua kuka hallinnoi ja omistaa kaiken kerätyn datan metsistä.

## 2.2 Maastomittaukset

Kaukokartoitus perusteista metsien inventointia täydennetään maastossa tapahtuvilla mittauksilla. Puustotulkinnan mallinnukseen tarvitaan erityyppisiä metsiä koealamittauksiin. Yhdellä inventointikierrolla on keskimäärin 22 aluetta, joista jokaisella mitataan maastossa tavallisesti 700–800 kappaletta yhdeksän metrin säteellä olevaa ympyräkoelaa. Yksi yhdeksänmetrin kiinteäsäteinen ympyräkoela vastaa metsäkeskuksen 16\*16 metrin hilaruutua. Vaihtoehtoisesti voidaan mitata 150–200 kappaletta laajempaa puukarttakoealaa. Puukarttakoealat ovat laajuudeltaan 1000–2000 neliömetrin kokoisia. Inventointikierrolla voidaan myös yhdistellä erilaisia koelatyyppejä. (Metsäkeskus, 2021, s. 5)

Metsävaratietoon täydennetään kiinteäsäteisillä tai puukarttakoealoilla puustotunnusten lisäksi maaperään liittyviä tunnuksia. Metsästä poimitaan talteen esimerkiksi pääryhmä (metsä-, kitu- ja joutomaa), alaryhmä (kangas- ja suomaat), kasvupaikkaluokka (esim. tuorekangas), kasvupaikkaluokan lisämääre (tarkentava tieto kasvupaikasta) ja kuivatustilanne (ojitus). (Metsäkeskus, 2018, s. 13)

Metsävaratiedossa voi edelleen olla kuviokohtaisella maastoarvioinnilla kerättyä tietoa esimerkiksi taimikoista tai muiden toimijoiden metsäsuunnittelusta. Lisäksi maaperä- ja kasvupaikkatietoja ei saada luotettavasti kaukokartoituksella, joten ne perustuvat pääosin aiempaan maastoarviointiin. (Metsäkeskus, 2021, s. 4)

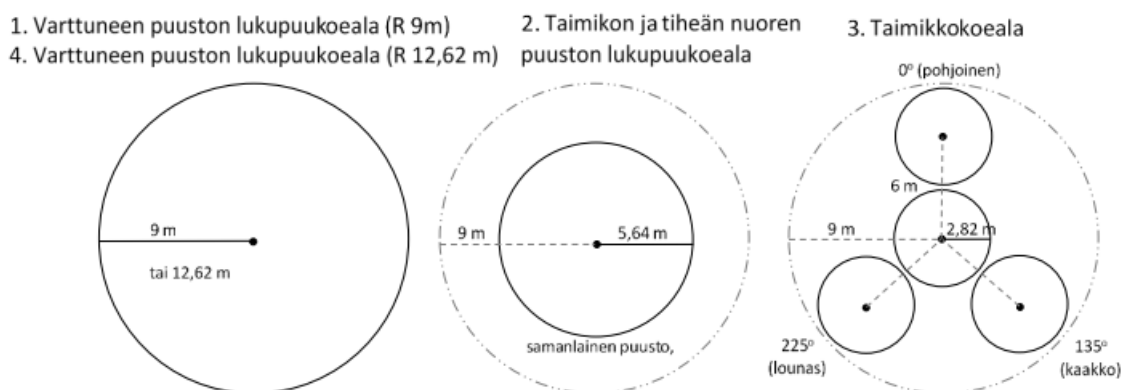
### 2.2.1 Kiinteäsäteinen ympyräkoela

Kiinteäsäteinen ympyräkoela on tarkasti kiinteällä säteellä rajattu alue, jonka sisältä puuston mittaukset suoritetaan. Kiinteäsäteisiä ympyräkoeloja mitataan yhdeltä inventointikierron alueelta 700–800 kappaletta (Metsäkeskus, 2021). Määrään hieman vaikuttaa onko

puustotulkintaa varten mitattu riittävästi erityyppisiä metsiä. Inventoinnin aikana voi jo ilmetä, että jonkin tyyppisistä metsistä tarvitaan lisää koaloja puuston tulkintaa varten. Koaloilta mitataan kaikkien puiden läpimitta rinnan korkeudelta, sekä valituista koepuista pituus. Puustolle määritetään ikä ja maaperästä ravinteisuus.

Koalapaikat ovat ennalta suunniteltuja eri kehitysvaiheessa ja tiheydessä olevia metsiä. Ympyräkoalan koko vaihtelee puuston pituuden ja tiheyden vaikutuksesta. Yleisohjeena voidaan antaa Metsäkeskuksen ohjeistuksen mukaan (Kuva 2), että varttuneet puustot mitataan joko 9 metrin tai 12,62 metrin säteellä tiheyden mukaan. Varttuneemmat taimikot ja tiheet nuoret puustot mitataan 5,64 metrin säteellä. Tämä edellyttää, että puusto on mitattavan koalan ulkopuolelta samanlainen yhdeksän metrin säteellä. Nuoret taimikot mitataan yhdeksän metrin säteen sisälle sijoitetuilla kolmella 2,82 metrin säteellä olevalla koalalla, joiden keskipisteet ovat kuuden metrin erotuksella toisistaan. Näiden ympyräkoalojen valintaan on vielä tarkentavia ohjeita, joiden perusteella mittaaja tekee valinnan mittaustavasta koalalla. (Metsäkeskus, 2018)

Kuva 2. Kiinteäsäteisin ympyräkoalan valinta puuston mukaan. (Metsäkeskus, 2018)



### 2.2.2 Puukarttakoeala

Puukarttakoeala mittaus perustuu tarkkaan puiden sijainnilla tarkennettuun puustotietoon. Metsävaratietojen inventointi kierrolla mitataan jokaiselta alueelta noin 150–200 puukarttaa. Puukarttakoeala on laajempi kokonaisuus kuin kiinteäsäteinen ympyräkoela. (Metsäkeskus, 2021)

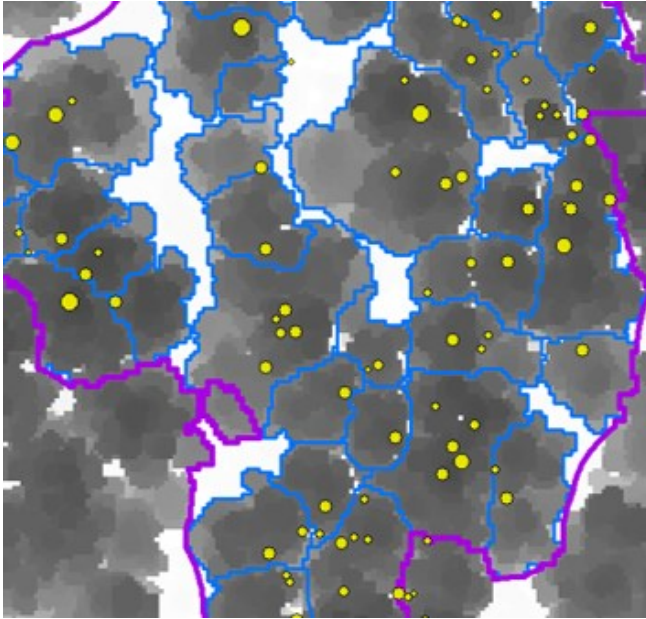
Puukarttoja mitataan ennalta määritetyiltä alueilta, joiden kokoa ei ole tarkkaan määritetty. Ennakko suunnittelulla on pyritty rajaamaan koealan paikka siten, että jokin reuna tai reunat rajoittuisivat ajouraan tai muuhun selkeä piirteiseen avoimempaan kohtaan. Rajaus pyritään lisäksi toteuttamaan pinta-alaltaan noin 1000–1500 neliömetrin kokoiseksi, jossa mitattavia puita on arviolta 100–200 kappaletta. Rajatulla alueella olisi hyvä olla puustossa hieman vaihtelua tiheyden, pituuden ja puulajien osalta, näin saadaan mahdollisimman kattava ja monipuolinen otos. (Antinluoma ym., 2020)

Yksi puukarttakoeala vastaa 4–20 tulkintakoealaa, jossa puukartoille voidaan generoida useita puustotulkinnan referenssikoealoja, jotka rajataan puiden välistä latvuksien perusteella. Tämä ei kuitenkaan sulje pois kiinteäsäteisien koealojen mittausta, joita suoritetaan harvinaisemmista ja pienemmistä puustoista. On myös mahdollista yhdistellä eri koealatyyppjä täydentämään toisiaan. (Metsäkeskus, 2021; Antinluoma ym., 2020)

Puukarttakoealoja ei voida mitata kaikenlaisista metsistä. Parhaiten soveltuvia metsiä ovat sellaiset, joissa latvukset ovat selkeästi erotettavissa. Latvuksien erottuminen on tärkeää, koska puiden sijaintia verrataan ylhäältäpäin kuvattuihin laser- ja ilmakuva-aineistoihin. (Kuva 3) Käytännössä edellä mainitusta syystä, mitattavan puuston tiheyden ollessa yli 1500–2000 r/ha, koealaa ei mitata puukarttakoealana. Mittaamatta jätetään myös metsät, joiden puusto on normaalista poikkeavaa, alle kahdeksan metristä tai koeala on hankalasti mitattavassa paikassa. Hankalasti mitattavia paikkoja voisi olla esimerkiksi koealalla sijaitseva leveä oja tai jyrkkä rinne. (Antinluoma ym., 2020)

Kuva 3. Tiheässä puustossa latvuksen erottaminen vaikeata. Keltaisella mitattuja puita, sinisellä latvusrajattuja puuryhmiä, violetilla puukarttakoealan raja. (Antinluoma ym., 2020)

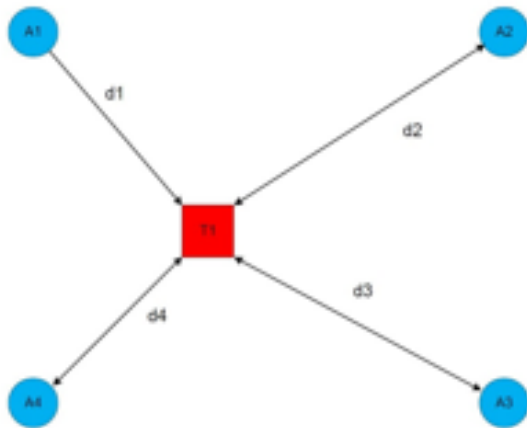




Puiden sijaintipaikannus toteutetaan pseudoliittien avulla. Pseudoliitti- eli tukiasema paikannuksessa, muodostetaan puukarttakoealalle paikallinen koordinaatisto tukiasemien avulla. Tukiasemien sijainnin paikannus perustuu tukiasemien väliseen yhteydenpitoon. (Metsäkeskus, 2021)

Kuvassa 4 havainnollistetaan miten paikannettavasta puun sijainnista, mitataan etäisyydet tunnettuihin tukiasemien sijainteihin. Näiden etäisyyksien perusteella voidaan määrittää paikannettavan sijainti. (Antinluoma ym.,2020)

Kuva 4. Paikannettavasta sijainnista (T1) mitataan etäisyydet (d1, d2, d3, d4) tunnettuihin sijainteihin (A1, A2, A3, A4). (Antinluoma ym.,2020)



Käytännössä tässä tarvitaan vielä mittasakset, jotka ovat yhteydessä tukiasemiin ja mittaajan taskussa kulkevaan matkapuhelinsovellukseen (TerraHärp). Mittasakset ovat yhteydessä koelalla sijaitseviin tukiasemiin, ja mittaus tilanteessa lähettää sijainnin paikallisessa koordinaatistossa ja puun läpimitan matkapuhelin sovellukseen (Kuva 5). Mittaaja määrittelee sovellukseen koelalta maastotiedot sekä puukohtaiset tarkennukset mittaustilanteessa.

Kuva 5. Kuvassa pseudoliitti (tukiasema), mittasakset ja matkapuhelinsovellus. (Antinluoma ym., 2020)



Puukarttakoealan nurkista otetaan tarkat sijainnit GNSS-paikannuslaitteella (Kuva 6), jolloin tämä paikallinen koordinaatisto voidaan myöhemmin sijoittaa päällekkäin valtakunnan tasokoordinaatistoon, tunnettujen kulmapisteiden avulla. Kulmapisteet ovat ennalta määriteltynä, mutta niiden sijainti tarkennetaan aina maastossa.

GNSS paikannus tapahtuu RTK (Real Time Kinematic) -menetelmää käyttäen. Tässä reaaliaikaisessa kinemaattisessa mittauksessa (RTK), laitteisto tekee havaintoja paikannussatelliitin kantaalloista sekä maanpinnalla olevan tukiasemaverkoston kantaallon vaiheista johtamalla tarkkoja sijainti määrittäksiä. (Metsäkeskus, 2021)

Kuva 6. GNSS-paikannus mahdollisimman ylhäältä Topcon Hiper VR -vastaanottimella ja Topcon FC-5000 -tallentimella.



### 2.3 Metsävaratiedon ajantasaistus

Metsäkeskuksen metsävaratieto perustuu lähinnä kaukokartoitusmenetelmällä kerättyyn tietoon, jota ajantasaistetaan kaukokartoitusinventointien välissä useilla eri tietolähteillä ja laskelmilla. Metsävaratiedon ajantasaistamista voidaan tehdä kasvattamalla puustoa laskennallisesti, päivittämällä puustotietoja ja toimenpide-ehdotuksia metsäsuunnitelmien pohjalta, metsänkäyttöilmoitusten perusteella, sekä metsänomistajien lähettämien päivitys pyyntöjen perusteella. Lisäksi metsien käytön muutoksia valvotaan satelliitti havaintojen perusteella muutostulkinta menetelmiä käyttäen. (Metsäkeskus, 2021, s. 3; Sirro ym, 2019)

Metsävaratiedon ajantasaistukseen on enenevässä määrin tullut mahdollisuus hyödyntää hakkuukoneelta saatuja tietoja. Hakkuukonetiedon päivitykseen on kehitetty laskentapalvelu, joka vastaanottaa hakkuukoneen sijaintia sekä työsuunnitelma tietoja. Näin saadaan selville käsiteltävien alueiden rajausta, hakkuutapa ja ajankohta. Harvennettujen puiden kertymää ei saada selville, mutta tällä hetkellä päästään riittävään tarkkuuteen päivittämällä jäävä puusto laskennallisten harvennusmallien mukaan. Seuraava kaukokartoitus tieto tarkoittaa viimeistään kuuden vuoden kuluttua etelässä ja 12 vuoden kuluttua pohjoisessa, olemassa olevan puuston määrän, kuitenkin ennen seuraavaa metsän käsittelyä. Hakkuukone tietojen saanti kuitenkin edellyttää metsäalan laajaa yhteistyötä, jota on valmisteltu jo vuosia. Ajantasaisesta metsävaratiedosta hyötyvät kaikki tiedon käyttäjät. (Heikkilä, 2022; Metsäkeskus, 2021, s. 11)

### 3 Laserkeilaus

Laserkeilaus (LiDAR - Light Detection and Ranging) on valon kulkuajkaan perustuva aktiivinen mittausmenetelmä. Menetelmässä lähetetään kohteeseen signaali ja vastaanotetaan kohteesta heijastuva signaali. Mittauslaitteisto rekisteröi signaalin kulkuajan ja tämän perusteella voidaan laskea etäisyys kohteeseen. Laserin ominaisuuksiin kuuluu tuottaa valoa yhdellä aallonpituudella, kun tavallinen valo puolestaan sisältää koko spektrin. Rönholm esittää (Teknillisen korkeakoulun luentomateriaali, 25.2.2010), että

Tavallista valoa voisi verrata siihen, että pianoa soitettaisiin painamalla aina kaikkia koskettimia yhtä aikaa. Laseria tässä tapauksessa vastaisi yhden ainoan koskettimen painaminen, jolloin yksittäinen taajuus (valolla aallonpituus) erottuu.

Laserkeilaamalla saadaan tuotettua kolmiulotteinen pisteistä muodostunut aineisto. Kun tunnetaan, keilaimen tarkka sijainti ja laukaistavan säteen kulma, voidaan määrittää pisteille tarkat koordinaatit. Tällöin jokaisella pisteellä on x, y ja z koordinaattitieto.

Laserkeilausaineistoa kerätään mm. korkeusmallien ajantasaistamista, rakennusten 3D-

geometrioiden muodostamista, tulvakartoitusta ja metsävaratiedon keruuta varten. (MML, n.d.-b)

Albert Einstein julkaisi jo vuonna 1917 ideoita ja teoreettisia perusteita laser valosta, mutta ensimmäiset onnistuneet laseretäisyysmittaukset suoritettiin 1962 (Massachusetts Institute of Technology). Maa-asemat mittasivat laserin avulla vuonna 1964 NASA:n satelliitin (Beacon B) etäisyyttä, jonka jälkeen puolustusvoimat maailmalla kiinnostuivat laseretäisyysmittauksen avulla löytää sukellusveneitä. Tuolloin ei kuitenkaan osattu vielä rakentaa varsinaisia laserkeilaimia. Aiheeseen paneuduttiin ja tehtiin paljon tieteellisiä kokeita, joiden tuloksena 1980-luvulla tuli ensimmäiset kaupalliset laserkeilaimet. GPS/inertialaitteiden kehittyminen mahdollisti keilaamisen lentokoneista ja helikoptereista 80–90-luvun taitteessa. Laserkeilauksen alkuvaiheista on kertonut Yliopistolehtori Petri Rönholm (henkilökohtainen tiedonanto, 25.2.2010) TKK:n luentomateriaalissaan.

### **3.1 Lentolaserkeilaus, ALS**

Ilmalaserkeilaimet (ALS, Airborne laser scanning) soveltuvat erityisesti laajojen alueiden kartoittamiseen, sillä keilain sijoitetaan useimmiten lentokoneeseen tai helikopteriin, nykyisin myös drooneja käytetään enenemissä määrin. Lentojen korkeudet vaihtelevat muutamasta sadasta metristä useaan kilometriin, käytetyn laitteiston ja mittauksen tarpeen mukaan. Suomen kasallisessa laserkeilausohjelmassa ilmalaserkuvaus tehdään 1,5–2 kilometrin korkeudesta. (Geocenter, n.d; Metsäkeskus, n.d.)

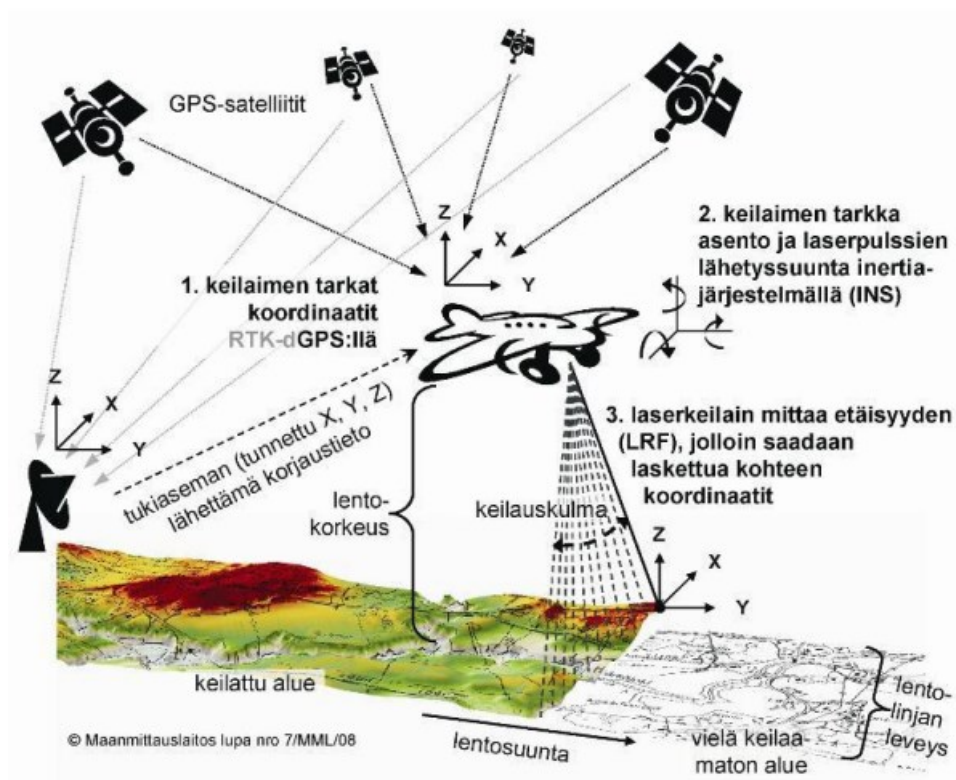
Laserkeilaaminen perustuu keilaimesta lähetettäviin pulsseihin ja niiden kohteesta takaisin heijastuvien signaalien (kaikujen) vastaanottamiseen. Mittauslaitteisto rekisteröi signaalin kulkuajan ja tämän perusteella voidaan laskea etäisyys kohteeseen. Paluukaikuja syntyy kaikista kohteista joihin pulssit osuvat ja näistä pisteistä saadaan muodostettua 3D mallinnuksia. Lentolaserkeilauksessa (Kuva 7) käytetään tarkkaa GPS-paikannusta ja inertipaikannusta kallistuskulmien havainnointiin, joiden avulla saadaan laskettua mitatuille pisteille tarkat koordinaatit.

Yksittäinen lasersäde ei ole maassa kovin pieni, vaan se valaisee laajemman alueen (0,1–3,8 m) lentokorkeudesta ja lasersäteen avauskulmasta riippuen. Tyypillisesti käytetään avauskulmana 0,3–2 milliradiaania. (Rönholm, n.d.-a)

Lasersäde hajaantuu, mitä pidemmän matkan se kulkee ja sitä kutsutaan divergenssiksi. Divergenssin mittayksikkönä käytetään radiaania, joka osoittaa virhemahdollisuuden xy-suunnassa. Lasersäteen avauskulman ollessa 0,5 milliradiaania ja lentokorkeus kaksi kilometriä, maahan osuva lasersäde osuu maassa mihin tahansa kohtaan metrin halkaisijalla olevalle alueelle. Vastaavasti, lentokorkeuden ollessa kilometri ja käytetään samaa 0,5 milliradiaalin avauskulmaa, divergenssi on 0,5 metriä. (Kouva, 2017)

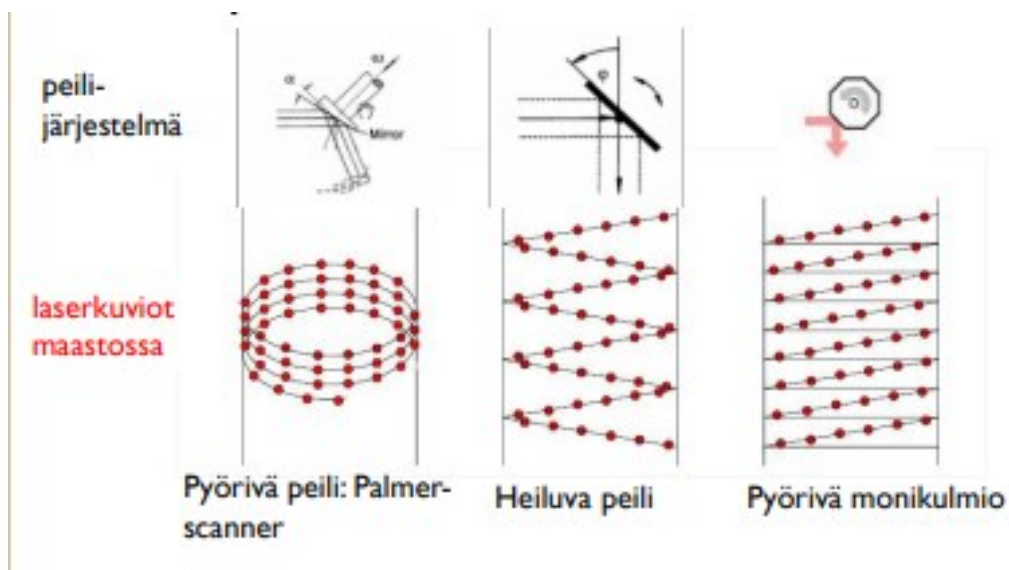
Kuva 7. Maanmittauslaitoksen havainnekuva ilmalaserkeilauksen periaatteista. (Kantonen, 2014)

# Laserkeilaus



Lasersäde ei mene suorassa linjassa maan päälle vaan se ”ammutaan” liikkuvan peilin kautta, jolloin laitteesta muodostuu keilain. Keilaimen avulla, on mahdollista skannata laajempia alueita kerralla. Keilaimissa käytetään erilaisia ratkaisuja kuvioinnin saavuttamiseksi (Kuva 8). Yleisimmin keilaimissa käytetään heiluvaa peiliä eli oskilloivaa menetelmää. Muita yleisesti käytettyjä keilaimia ovat, pyörivä monikulmio peili eli polygonpeili sekä pyörivä peili eli palmer-scanner, jolla saadaan ellipsin muotoista keilaus kuviota aikaiseksi. (Rönholm, n.d.-a)

Kuva 8. Laserkeilauksen erilaisia menetelmiä. (Rönholm, n.d.-a)

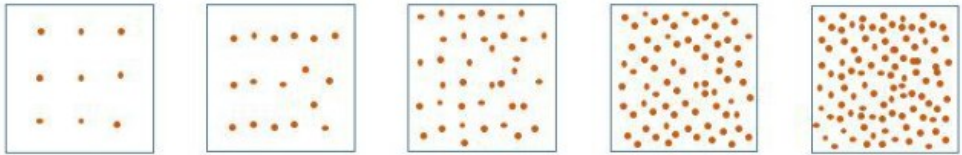


Kaikuja syntyy esimerkiksi kasvillisuuden tai rakennusten eri osista, joista muodostuu 3D pistepilvi kuvastamaan kohteen muotoja. Pistepilven tiheys voi vaihdella yhdestä pisteestä yli sataan pisteeseen neliömetrillä. Tähän vaikuttaa lentolaserkeilauksessa käytettävä laitteisto sekä lentokorkeus. Joten, mitä enemmän saadaan pisteitä neliömetrille, voidaan mahdollistaa parempi erotuskyky, jolloin yksittäisten kohteiden tulkinta helpottuu. (Terratec, n.d.)

Laserkeilaimen käyttöä suunniteltaessa, pistetiheysvaatimus on merkittävä tekijä hankkeen kokonaiskustannuksissa (Kuva 9). Kuvassa yhdeksän on esitelty, laserkeilaimen pistetiheyksien riittävyyttä erilaisissa kohteissa. Harvoilla pistetiheyksillä (0,5–1 pst / m<sup>2</sup>) voidaan hyvin luoda malleja maaston pintakerroksista. Pienillä pistetiheyksillä (1–2 pst / m<sup>2</sup>)

on mahdollista luoda tulvamalleja. Tarkkuus riittää tunnistamaan jopa puroja puuston latvuksen alta. Pisteväli on tässä tiheydessä 0,7–1 metriä. Keskimääräisiä pistetiheyksiä (2–5 pst / m<sup>2</sup>) käytetään tyydyttämään useimpien tarpeet. Pistetiheys ei kuitenkaan riitä rakennusten 3D-mallinnukseen. Suuria pistetiheys pistepilviä (5–10 pst / m<sup>2</sup>) käytetään 3D-kaupunkimallinnuksessa ja riittää vangitsemaan rakennusten perusmuodot. Erittäin tiheet (10+ pst / m<sup>2</sup>) pistepilvet tuottavat tarkkoja mallinnuksia ja yksityiskohtia rakennuksista. (Rohrba, 2015)

Kuva 9. Pistetiheyksiä ja niiden käyttökohteita. (Rohrba, 2015)

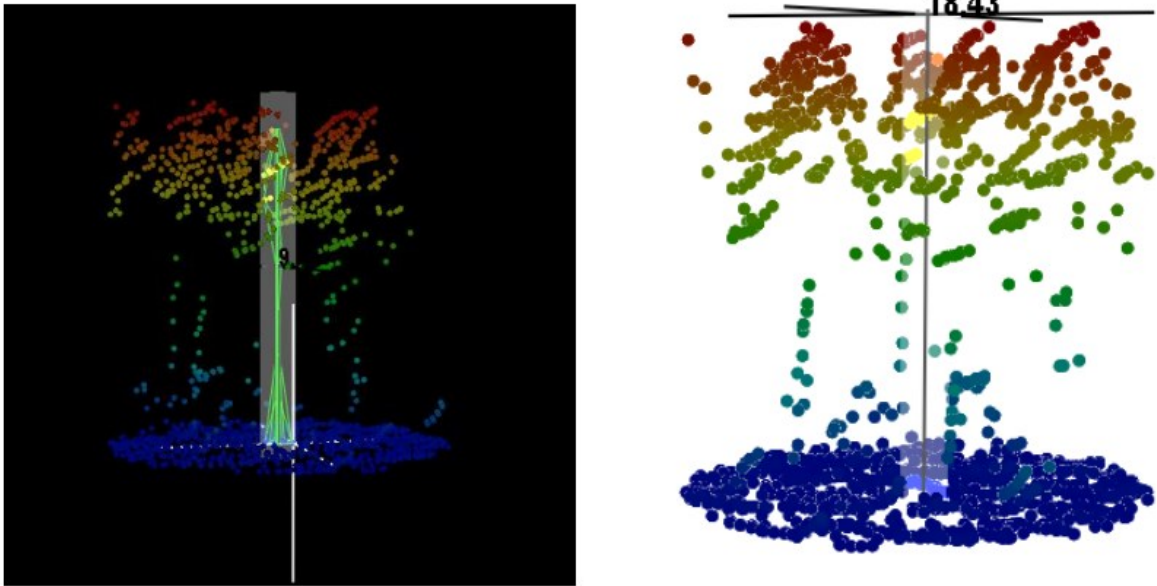


Point Density	0.5-1 pts/m <sup>2</sup>	1-2 pts/m <sup>2</sup>	2-5 pts/m <sup>2</sup>	5-10 pts/m <sup>2</sup>	10+ pts/m <sup>2</sup>
Application	<ul style="list-style-type: none"> <li>Basic Surface Model</li> <li>Forest Inventory</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flood Modelling</li> <li>Dam and Water Inundation Calculations</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multi-purpose data sets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Basic 3D models</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Detailed 3D city models</li> </ul>

Pistepilvestä voidaan erottaa jälkikäteen jokainen piste (Kuva 10) ja suodattaa tarpeettomat kaiut pois. Laserkeilauksella saadaan tehokkaasti tarkkaa ja kolmiulotteista tietoa mm. puuston ja maaston rakenteesta. Pistepilvi soveltuu pohja-aineistoksi lukuisilla eri sovellusaloilla kuten infrasuunnitteluun, tulvamallinnukseen, ympäristötutkimukseen, maisemantutkimukseen, metsäntutkimukseen ja kulttuuriperinnön hoitoon ja tutkimukseen. (Geocenter, n.d.)



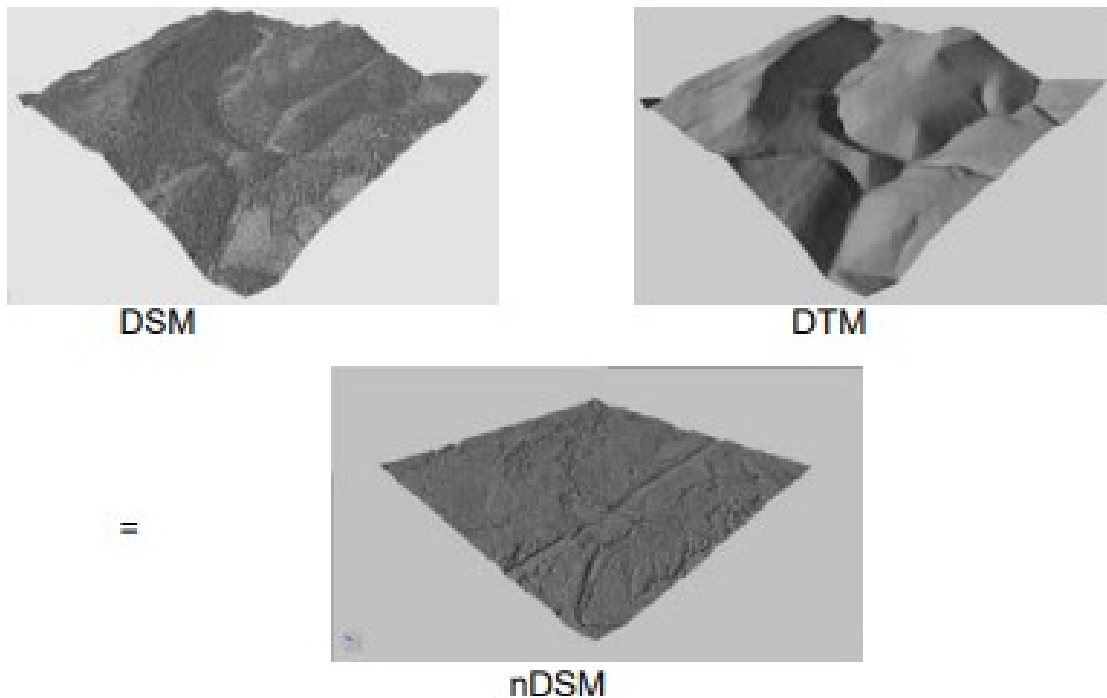
Kuva 10. Laserpistepilven analysointia Fusion ohjelmalla.



Metsäisellä alueella ensimmäinen kaiku tulkitaan puuston latvukseksi ja viimeinen kaiku maan pinnaksi. Näin maan pinnan muoto on mahdollista mitata myös kasvuston peittämällä alueella sekä laskea puustolle pituus. (Geocenter, n.d.)

Laserdataa voidaan luokitella jälkikäteen aina kulloisenkin tarpeen mukaan, jolloin aineistosta saadaan eroteltua erilaisia kohteita. Aluksi laserdata on digitaalinen pintamalli eli DSM (Digital Surface Model). Tässä pintamallissa on kaikki, mitä keilain on havainnut, eli maaston pinta, puut ja rakennukset. Kun puut ja rakennukset suodatetaan pois, jäljelle jää pelkästään viimeiset kaiut havaittaviksi. Tätä kutsutaan digitaaliseksi korkeusmalliksi eli DTM (Digital Terrain Model). Tässä korkeusmallissa on havaittavissa vain maaperän muodot ja tämä maastomalli on yleisin laserkeilaus tuote. Datasta voidaan muodostaa myös haluttaessa, vaikka normalisoitu pintamalli eli nDSM (normalized Digital Surface Model), jossa maanpinnan vaikutus on poistettu (Kuva 11). Puuston tulkinnessa käytetään usein apuna lisäksi laserpilven värjäystä, jotta voidaan tulkita paremmin eri puulajeja (Rönholm, n.d.-b)

Kuva 11. Laserdatan digitaalisia malleja. (Rönholm, n.d.-b)



### 3.2 Liikkuva laserkeilain, MLS

Liikkuva laserkeilain (MLS, Mobile Laser Scanning) toimii samalla periaatteella kuin ilmalaserkeilain, mutta kulkee maalla. Alustana tämänkaltaisessa laserkeilaimessa on jokin ajoneuvo, esimerkiksi laiva, auto tai mönkijä. Liikkuva laserkeilain on nopea ja joustava tapa saada ympäristöstä 3D-mallinnuksia. Liikkuviin laserkeilaimiin luokitellaan myös, henkilökohtaiset laserkeilaimet (PLS, Personal Laser Scanning). Henkilökohtaiset laserkeilaimet ovat lähinnä selässä kannettavia reppukeilaimia. Henkilökohtaisten keilaimien suurin hyöty on niiden liikkuvuus ja käytettävyys huonoissakin maastoissa, joissa olisi erittäin hankalaa saada muuten kattavaa keilaustulosta aikaiseksi. Liikkuvat laserkeilaimet vaativat paikannus laitteiston ja inertia järjestelmän keilaus hetken asennon ja sijainnin tunnistamiseen. (El Issaoui, 2017, s. 11)

### 3.3 Maalaserkeilain, TLS

Maalaserkeilaus (TLS, Terrestrial Laser Scanning) on staattista mittausta, koska mittausjalusta pysyy paikallaan. Maalaserkeilaimella saadaan ympäristöstä hyvinkin tarkkaa 3D-dokumentointia. Mittaus perustuu lasermittauslaitteistoon, jolla saadaan kohteesta tarkka sijainti ja etäisyys 3D koordinaatistossa. Staattinen mittaus tuottaa tarkempaa aineistoa kuin liikkuvat keilaimet, koska pistepilven yhdistäminen ei vaadi inertiaa eikä välttämättä paikannusmittauksien sovittamista. (El Issaoui, 2017, s. 12)

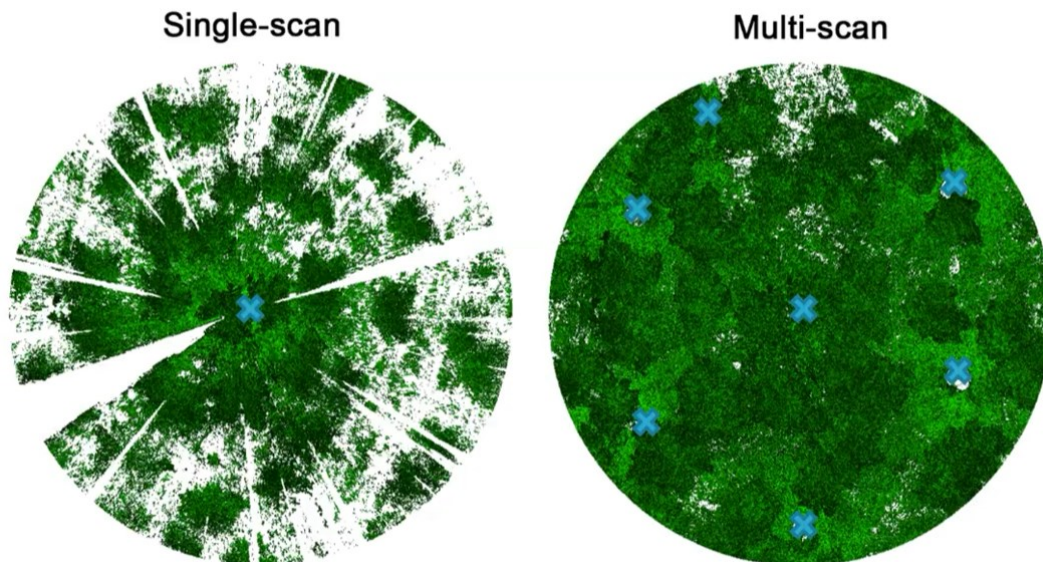
Mittaustilanteessa keilain pyörii vaakasuunnassa ja keilaimenpeili pyörii pystysuunnassa. Keilaimen runko usein rajoittaa peilin mittausaluetta, jolloin keilauskulmaksi jää noin 310 astetta. Tämä pystysuuntainen mittauskulma saattaa vaihdella eri valmistajien ja mallien välillä. Keilaimen rungon ei tarvitse pyöriä kuin 180 astetta saavuttaakseen koko ympäristön skannauksen, lukuun ottamatta jalustan varjostamaa aluetta. Teollisuudessa ei yleensä käytetä pyöriviä keilainmoottoreita, joilla saataisiin koko ympäristö mitattua. Teollisuuslaserkeilaimia käytetään usein pienten kohteiden mittaamiseen, joiden mittaustarkkuudessa päästään jopa alle millimetrin tarkkuuteen. (El Issaoui, 2017, s. 13)

Metsän mittaamisessa käytetään yleisesti kahta menetelmää, jotka ovat yksi- ja monikeilausmenetelmät. Ysikeilausmenetelmä (Single-Scan), jossa keilataan keskeltä koealaa yhden kerran. Yhden keilauksen menetelmän etuna on sen nopeus ja heikkoutena virheiden määrä. Yhden keilauksen menetelmässä syntyy keilaus kuvion myötä katvealueita johon keilain ei yletä. Katvealueelle jäänyt puusto jää huomiomatta kokonaan. Erityisen suuria katvealueita syntyy, jos keilaimen läheisyydessä, on järeää puustoa (Kuva 12). Keilain ei voi mallintaa puustoa muutoin kuin keilaimen näkyvältä puolelta. Ysikeilaus menetelmästä on opastanut yliopistotutkija Ville Kankare Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luonnossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Monikeilausmenetelmässä (Multi-Scan) tuotetaan pistepilveä mitattavalta alueelta useammasta kohdasta. Tässä voidaan käyttää useampaa keilainta samanaikaisesti tai keilata yhdellä keilaimella useamman kerran, jolloin menetelmästä tulee erittäin hidas. Monikeilaus menetelmä vaatii tähyksien asentamisen mitattavalle alueelle. Tähykset auttavat

tunnistamaan kahdesta tai useammasta kuvasta päällekkäisyydet ja näin voidaan liittää mittausaineistot yhteen, jolloin kartasta saadaan tarkka. Monikeilausmenetelmällä saadaan kuvannettua puusto molemmilta puolilta, kun yksikeilausmenetelmässä jää puuston toinen puoli huomioimatta (Kuva 12). Useammasta paikasta tapahtuva keilaus tuottaa huomattavasti yksityiskohtaisempaa ja kattavampaa tulosta metsikön keilauksesta. Monikeilaus menetelmästä ja tähyksistä on opastanut yliopistotutkija Ville Kankare Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Kuva 12. Yksikeilaus vs. monikeilaus aineiston kattavuus. Ville Kankareen kuva (Holopainen, 2013)



Tähykset ovat usein pallon muotoisia, mutta tähyksinä voivat olla myös tasot sekä tähystaulut tai -kulmat (Taivassalo, 2017, s. 8). Tähykset voidaan asentaa mitattavissa kohteissa kolmijalalle sekä kiinnittämällä magneeteilla tai remmeillä ympäristöön. Mitattavalla ympäristöllä on vaikutusta tulokseen sekä siihen paljonko mittauksia on tehtävä. Tavoitteena on kuitenkin saada mahdollisimman kattava pistepilvi, johon voidaan vaikuttaa ennakkosuunnittelulla, mainitsee yliopistotutkija Ville kankare Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

### 3.4 Maastolaserin (TLS) käyttö Evon koealoilla

Evon koealoja on kuvattu maastolaserilla (TLS) vuodesta 2010 alkaen. Uusi koealaverkko perustettiin 2014, joka sisälsi 120 koealaa. Vuosien saatossa on Evon metsäalueilla suoritettu hakkuita, joiden vaikutuksesta koealoja on vuonna 2021 jäljellä 104 kappaletta. Kyseisillä koealoilla on saavutettu tärkeä tutkimusverkkostatus ja vastaavanlaista koealaverkostoa ei muualla maailmassa ole. Koealaverkostoa hyödyntää useampi taho omiin tutkimuksiinsa ja koealoilla on suoritettu useita mittauksia vuosien varrella eri menetelmillä. Vuonna 2021 suoritetuissa TSL-kuvauksissa, keväällä ja heti uudelleen syksyllä, saatiin hyvin tarkkaa aineistoa yhden kasvukauden ajalta. Tutkimusten oli tarkoitus tuottaa mahdollisimman tarkkaa metsätietoutta. Tarkka metsätieto mahdollistaa täsmämetsätalouden harjoittamisen. Nykyaikaisilla metsänmittausmenetelmillä kerätyssä datassa on myös se etu, että aineistoon voidaan aina palata jälkikäteen ja poimia uusia tunnuksia aineiston käsittelyjen kehittyessä. Tämä mahdollistaa uusien tunnusten mittaamisen puustosta esimerkiksi latvuksen osalta. Tutkimuksesta Evon koealoilla kertoi luennollaan Hämeen ammattikorkeakoulussa yliopistotutkija Ville Kankare (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Evolla käytetty maastolaser malli on Leica RTC360 (Kuva 13), jonka arvo on noin 40 000 €. Evolla keilaimella kuvataan 32 \* 32 metrin koealoja. Kuvaus maastolasereilla tapahtuu latvusten alla, kun taas usein metsän kuvauksessa käytetty ilmalaserkeilain kuvaa latvusten yläpuolella. Ilmalaserkeilaimella päästään noin 10 200 pisteen tarkkuuteen koealatasolla, kun taas maastolaserilla noin 138 miljoonaa pisteeseen Evon koealoilla.

Maastolaserkeilauksessa puuston tunnistus ja datan laatu on erittäin hyvää. Vaikka laserkeilauslaitteisto kestääkin nykyisin jonkin verran vettä, niin kuvaaminen sateella ei ole järkevää. Sateella pistepilven kuvaan tulee paljon kohinaa, johtuen ilmassa olevista vesipisaroista. TLS-keilaimesta kertoi luennollaan Hämeen ammattikorkeakoulussa yliopistotutkija Ville Kankare (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Kuva 13. Evon koealoilla käytetty maalaser-laitteisto. Ville Kankareen kuva.

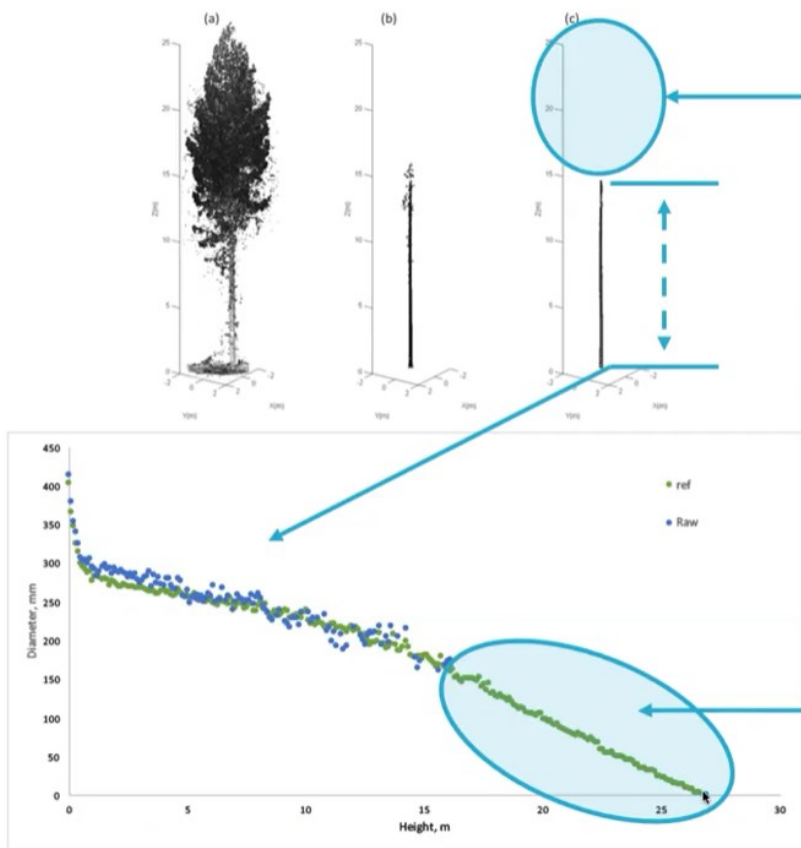
### ▪ Leica RTC360

- Fov: 360° x 300°
  - Kantavuus: 0.5m – 130m
  - Resoluutio: 3/6/12 mm @ 10 m
  - VIS (Visual Inertial System)
  - Paino: 5.35kg
  - Käyttölämpötila: -5° - +40°C
  - IP54 luokiteltu
- Ohjataan suoraan keilaimesta tai mobiilisovelluksesta

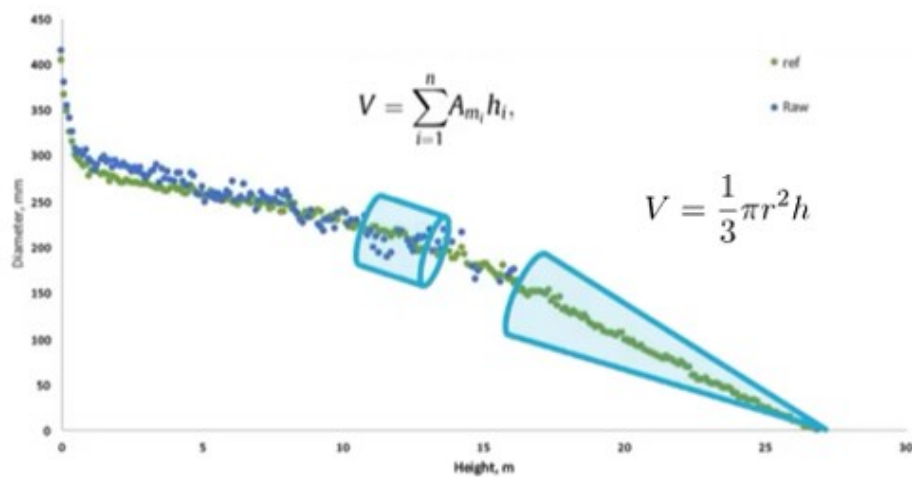


TLS-kuvaukset tapahtuvan latvusten alapuolella, jolloin keilauksessa jää pidempien puustojen latvukset kuvantamatta. Näiden mallintamiseen otetaan puustotunnuksista johdetut runkokäyrät avuksi. Kuvassa 14 havainnollistetaan laserkeilaimen tarkkuutta yksittäisen puun tasolla. Kuvauksessa käytetty puu on leikattu koko rungon mitalta kymmenen sentin kiekkoiksi. Kiekkojen leikkauskohdan korkeutta ja läpimittaa verrataan, laserkeilaimen tuottamaan malliin. Kuvassa 14 on sahatuista kiekkoista mitatut tunnuksat vihreällä ja laserkeilaimen tuottama puustotunnus sinisellä värillä. Laserkeilaimen tunnuksat loppuvat noin 15 metrin korkeudelle. Läpimitan mittatarkkuus on maastolaserilla millimetrin luokkaa (alle 1 cm), pituuden osalta syntyy aliarviota 0–6,5 metriä. Mittauksessa luetaan korkeimman pistehavainnon mukaan. Etenkin vanhoissa kuusikoissa on haastavaa saada latvan kärki näkyviin. Pituuden osalta aliarviota syntyy muillakin mittausten menetelmillä (maastomittaus, ALS, TLS), yliarviota syntyy harvoin. Tilavuuden laskentaan käytetään rungon osalle Huberin kaavaa, ja latvuksen tilavuus lasketaan kartion tilavuutena (Kuva 15). TLS-keilaimen tarkkuuteen liittyvästä tutkimuksesta, on kertonut Yliopistotutkija Ville Kankare Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Kuva 14. Laserkeilauksen runkokäyrän pituus ja läpimittaluokat. Ville Kankareen kuva.



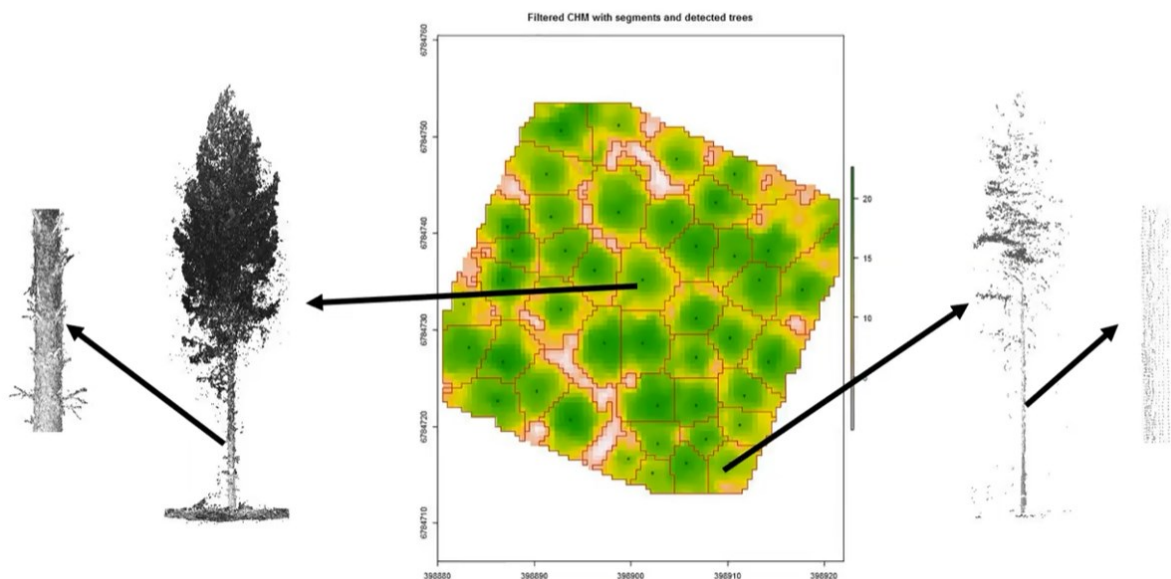
Kuva 15. Rungon osien tilavuuden laskenta Huberin kaavalla ja latvuksen tilavuus kartion kaavalla. Ville Kankareen kuva.



Metsikön rakenteella, käytettävällä menetelmällä ja pistepilven laadulla on suuri merkitys lopputulokseen. Laadukkaalla aineistolla voidaan tuottaa myös oksajakauma, joka tehdään lähinnä alaoksien perusteella, koska latvus saattaa jäädä kuvantamatta. Tällä hetkellä ei pystytä kuvantamaan vielä koko oksajakaumaa, mutta kehitystä tähän on tullut viime vuosina reilusti. Metsäteollisuus on erityisen kiinnostunut oksatason tunnuksista, jotka kuvastavat suorassa suhteessa metsikön laatuun liittyviä tekijöitä. Pistepilven laadusta ja siihen liittyvästä kiinnostuksesta, on kertonut Yliopistotutkija Ville Kankare Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Kankare jatkaa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021), että pistepilvi harvenee etäisyyden funktiona koealan reunoja kohti mennessä. Kuvassa 16 havainnollistetaan, miten hyvin keilaimen lähietäisyydellä, oleva puusto kuvantuu pistepilvellä, kun taas kuvion reunalla olevasta puusta yksityiskohdat ovat jo hyvin rajalliset.

Kuva 16. Pistepilven harveneminen etäisyyden funktiona. Ville Kankareen kuva.



Evon koealoilla käytetään monikeilausmenetelmää (Multi-Scan) (katso luku 3.3). Tämä on selkeästi hitaampi tapa keilata, mutta tarkoituksena on saada mahdollisimman kattavaa materiaalia, josta voidaan myös myöhemmin saada tarvittavia tunnuksia kerätyksi. Monikeilausmenetelmä vaatii useampia keilauksia koealalta ja tämän mahdollistamiseksi koealalle on levitettävä tähyksiä kattaviin paikkoihin.



Evolla koealat ovat 32\*32 metriä (1024 m<sup>2</sup>) ja tälle alueelle levitetään kuusi tähysspalloa. Keilauksia tehdään jokaiselta koealalta yhdeksän kappaletta. Ensimmäinen kuvaus tehdään koealan keskeltä, jossa kaikkien tähyssallojen on näyttävä. Lisäkeilaukset tehdään koealan ympäriltä, koealan kulmista ja pitkien sivujen keskeltä. Kaikissa lisäkeilauksissa vähintään kolmen tähyksen tulee olla nähtävissä. Tähyksien asentamisessa apuna voidaan käyttää kolmijalkaa tai remmejä puihin kiinnittämiseksi. Keilauksesta Evolla on kertonut Yliopistotutkija Ville Kankare (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021) Hämeen ammattikorkeakoulussa pitämässään luennossa.

Jatkuvapeitteinen kasvatus tuo haasteita mittaukselle, koska tiheästä alikasvoksesta aiheutuu herkästi katvealueita keilaukseen. Jatkuvapeitteinen kasvatus tuo haasteita myös kasvumallien osalta huomauttaa yliopistotutkija Kankare (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021).

Vuoden 2014 keilauksessa määritettiin puille tarkat sijainnit, mittaamalla tähyksien paikat tarkkaan RTK:lla. Näiden sijaintien avulla TLS pilvi rekisteröitiin ulkoiseen koordinaatistoon. Pistepilveä prosessoitaessa voitiin laskea tarkka sijainti rungon keskipisteeseen. Puiden sijainnista Evon koealoilla kertoi yliopistotutkija Ville Kankare (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021) luennollaan Hämeen ammattikorkeakoulussa.

#### **4 Puukarttakoealan mittausvälineet**

Tutkimuksen maastomittauksien tekemistä varten käytettiin puukarttakoeala mittauksessa tarvittavia tavanomaisia välineitä kuten:

- Matkapuhelin – koealoille navigointia varten ja mittaussovellus TerraHärpin käyttöä varten.
- Mittasakset – puustotietojen keräämiseen ja paikantamiseen.
- Tukiasemat – Muodostaa paikallisen koordinaatiston koealalle. 16 kpl.

- Paikannuslaitteet (GNSS) – Tarkkojen kulmapisteiden sijainnin määrittämiseen, mahdollistaen aineistojen tarkan yhdistämisen.
- Vertex – Puuston pituuden mittaukseen.
- Ikkäaira – Puuston iän määrittämiseen.
- Merkintäliidut – Puiden merkitsemiseen.
- Kuitunauha – Koeala merkintöihin.

#### 4.1 Mittasakset

Puukarttakoeala mittauksessa käytetään Masser Excaliper II -mittasaksia (Kuva 17). Masser on yhteistyössä Terratecin kanssa kehittänyt laitteistoa puiden sijainnin määrittämiseen ja testannut niiden käyttöä jo vuodesta 2017 alkaen. (Ruusunen, 2020, s. 5)

Masser Excaliper II saksissa on TTreemap -metsänmittaussovelluksen lisäksi paikannuselektroniikkaa sekä sähköinen kompassi, jonka avulla voidaan määrittää, mistä ilmansuunnasta puu on mitattu. Niin paikannuselektroniikka kuin kompassikin vaativat aina kalibroinnin jokaisella koealalla mittauksen alkaessa. Kalibrointi suoritetaan tekemällä kahdeksikonmuotoista lenkkiä 5–10 sekuntia koealalla. (Ruusunen, 2020, s. 8)

Mittasaksissa on langaton tiedonsiirto. Tiedonsiirto toteutetaan Bluetooth yhteyden kautta, joka mahdollistaa myös reaaliaikaisen tiedonsiirron mittauksen aikana. Mittasaksien käytettävyyttä on lisäksi kehitetty hyvin ergonomiseksi lisäkahvojen ansiosta (Kuva 17).

Mittasaksien läpimitta-anturi on erityisen arka magneettisuudelle. Magneetille altistuminen rikkoo mittasakset. Käytössä tulee olla hyvin huolellinen, koska jopa matkapuhelimen suojakotelossa voi olla magneetti. (Antinluoma ym, 2020)

Kuva 17. Masser Excaliper II -mittasakset, treemap -metsänmittaussovelluksella ja ergonomisilla lisäkahvoilla.



## 4.2 GNSS-Paikannin

Puukarttakoealan paikannukseen käytettävä laitteisto on maastotallennin Topcon FC-5000, jossa käytössä paikannussovelluksena Magnet Field. Paikantaminen vaatii vielä vastaanottimen, joka on Topcon Hiper VR sekä kolmijalan jatkovarrella vastaanottokyvyn parantamiseksi (Kuva 18).

Topcon Hiper VR-vastaanotin kykenee hyödyntämään GNSS- satelliittipaikannusjärjestelmiä erityisen tehokkaasti. Vastaanotin kykenee hyödyntämään ainakin Yhdysvaltojen GPS-, Venäjän GLONASS-, Euroopan Galileo-, Japanin QZSS-, sekä Kiinan Beidou- ja Compass-satelliitteja. Eri satelliitteja käytettäessä paikannuksen katveajat saadaan lyhenemään ja paikantamisesta tulee tehokkaampaa. Topcon Hiper VR kykenee millimetrin tarkkuudella olevaan laitteiston sijainnin paikannukseen. Tähän vastaanotin käyttää RTK-paikannusta (Real Time Kinematic). RTK-paikannuksessa laitteisto tekee havaintoja paikannussatelliitin

kantoaalloista sekä maanpinnalla olevan tukiasemaverkoston kantaallon vaiheista johtamalla tarkkoja sijainti määrittämiä. Sijaintitarkkuus riippuu esimerkiksi ilmakehäolosuhteista, satelliittien lukumäärästä, satelliittigeometriasta, säätilanteesta, puustosta ja mittajaan toiminnasta. Lisäksi Topcon Hiper VR-vastaanottimessa on sisäinen 4G-modeemi, Wi-Fi, Bluetooth (300 metriin asti) ja muistia 8GB. Käyttöaika yhdellä latauksella jopa 15 tuntia. Topcon Hiper VR vastaanottimesta kerrotaan Metsäkeskuksen sisäisiltä intranetsivuilta löytyvässä Puukarttojen paikannusohjeessa (Metsäkeskus, henkilökohtainen tiedonanto, 10.5.2021).

Kuva 18. Topcon FC-5000 (oikealla ylhäällä), Topcon Hiper VR (oikealla alhaalla) ja kolmijalka jatkovarrella (vasemmalla).



Topcon FC-5000-tallennin (Kuva 18) on pienikokoinen maastoon sopiva Windows 10-käyttöjärjestelmää käyttävä tietokone. Tallentimessa on seitsemän tuuman näyttö, jota pääsääntöisesti käytetään kosketusnäyttökynän avulla. Bluetooth yhteys ylittää jopa 500 metriin saakka, joten mittaja voi kulkea rauhassa koealalla mittauksen aikana. Topcon FC-5000-tallentimesta kerrotaan Metsäkeskuksen sisäisiltä intranetsivuilta löytyvässä Puukarttojen paikannusohjeessa (Metsäkeskus, henkilökohtainen tiedonanto, 10.5.2021).

Magnet Field-paikannussovellus on asennettuna tallentimelle. Paikannussovelluksella seurataan sekä ohjataan koko mittaus tapahtumaa. Paikannustapoina käytetään ensisijaisesti RTK-paikannusta. RTK-paikannuksella saadaan tuotettua nopeasti senttimetriluokan sijaintipaikannus. Mitattuja sijaintipaikannuksia voidaan vertailla keskenään. RTK-sijaintien tuottaminen edellyttää matkapuhelinverkkoa, joten laitteistoissa (tallennin ja vastaanotin) on molemmissa sim-kortit. Toissijaisina paikannustapoina käytetään RTK-paikannusta raakadatan keräyksellä sekä staattista paikannusta. RTK-paikannusta raakadatalta keräyksellä käytetään esimerkiksi silloin, jos verkkoyhteydet ovat huonot tai liian peitteinen horisontti (latvusto tai mäki). Mittauksessa voidaan tehdä samanaikaisesti RTK-paikannuksia sekä kerätä staattiseen paikannukseen perustuvaa raakadataa, jolle on tehtävä jälkikorjaus tarkan sijainnin muodostamiseksi. Staattinen paikantaminen tulee kyseeseen siinä vaiheessa, jos verkkoyhteyksiä ei ole (häiriö ym.) tai horisontti on hyvin peitteinen. Staattisessa paikannuksessa mittalaitteen on oltava paikoillaan 20–30 minuuttia, jonka aikana kerätään raakadataa sijainnista. Staattisiin sijaintipaikannuksiin käytettävän ajan jäädessä lyhyemmäksi, kasvaa riski paikannuksen tarkkuudesta. Puukarttakoealojen RTK-paikannuksen toimivan keskimäärin hyvin koivikoissa ja männiköissä, alle 10 metrin kuusikoissa sekä soilla ja kallioalueilla. Eniten vaikeuksia on saada RTK-paikannus pitkissä kuusikoissa ja tiheissä harventamattomissa metsissä sekä notkelmissa. Magnet Field-paikannussovelluksesta ja RTK-paikannuksesta kerrotaan Metsäkeskuksen sisäisiltä intranetsivuilta löytyneessä materiaalissa Puukarttojen paikannukset (Metsäkeskus, henkilökohtainen tiedonanto, 26.3.2020).

### 4.3 Pseudoliitit ja TerraHärp-sovellus

Pseudoliitit ovat tukiasemia, joiden avulla muodostetaan paikallinen koordinaatisto. Paikallinen koordinaatisto on avuksi mitattaessa useita yksittäisiä sijainteja rajatulla alueella. Tukiasemia levitetään tasaisesti rajatulle alueelle yhteensä 16 kappaletta, jotka osaavat paikantaa itsensä paikallisessa koordinaatistossa. Tukiasemien sijainnin paikannus perustuu tukiasemien väliseen yhteydenpitoon. Tukiasemat lähettävät radiosignaalia, jota muut tukiasemat vastaanottavat, jolloin tukiasemaverkon jokaisen tukiaseman etäisyys muihin tukiasemiin voidaan määrittää. Tukiasemat sijoitetaan koealalle siten, että jokainen tukiasema voisi olla yhteydessä saman aikaisesti mahdollisimman moneen tukiasemaan.

Ainoastaan tukiasemille 0–3, on ennalta määritetty sijainti GPS 0-kulman läheisyyteen, mitattavan alueen lounaiskulmassa. Tukiasemia ripustettaessa on huolehdittava, ettei välittömässä läheisyydessä olisi suurta estettä, kuten puun runkoa, josta syntyy laaja katvealue. Hyviä ripustus paikkoja on pienet puut, oksat ja teko-oksat (Kuva 19). Tukiasemat kestävät vettä, mutta kosteus heikentää hieman tukiasemien kuuluvuutta. Tukiasemista ja niiden ripustamisesta on kerrottu Metsäkeskuksen sisäisiltä intranetsivuilta löytyvässä Puukarttakoealojen maastotyöohjeessa (Metsäkeskus, henkilökohtainen tiedonanto, 10.5.2020).

Kuva 19. Pseudoliitti ripustettuna teko-oksaan.



Pseudoliitit itsessään eivät kykene muodostamaan sijainteja mitattaville puille. Tähän tarvitaan lisäksi mittasakset ja matkapuhelinsovellus TerraHärp. Nämä kolme muodostavat kokonaisuuden puukarttakoealojen mittaukseen (Kuva 5, s. 13). Tukiasemien keskinäistä paikannustietoa tulee mittasaksilta puhelinsovellukseen niin kauan kun puhelimella on yhteys saksiin. Mittasaksissa on lähetinvastaanotin tukiasemaverkon yhteyden pitoon ja bluetooth-yhteys matkapuhelinsovelluksen käyttöön. Matkapuhelimelle kirjataan kaikki puustotiedot mittaajan määrittelemänä sekä mittasaksilla mitattuna. TerraHärp-sovellus ilmoittaa virheestä, jos mittauksessa ei saada riittävän moneen tukiasemaan yhteyttä. Virheilmoitus tulee, jos yhteyksiä on vain kolmeen tukiasemaan. Sovellus myös kertoo

koepuiden tarpeen. Kun kaikki on valmista, voidaan mittaus lopettaa ja lähettää tiedot palvelimelle.

TerraHärp on laitteisto kehittäjä Terratec:n tuote yhteistyössä mittasaksivalmistaja Masserin kanssa. Terratec Oy on norjalaisen Terratec AS:n tytäryhtiö, joka on yksi Pohjoismaiden suurimmista kartoitus- ja paikkatietoalan yrityksistä. Terratec on erikoistunut kartoitukseen ja suorittaa toimeksiantoja kaikilla mantereilla. (Terratec, n.d.)

#### 4.4 Paikannustarkkuus TerraHärpillä

Metsäkeskus ja tarkasteltavan mittalaitteiston kehittäjä Terratec, on tehnyt omia tutkimuksiaan puukarttakoealoille kehitetyn mittalaitteiston tarkkuudesta (Kuva 20). Metsäkeskus on kesällä 2019 aloittanut kolmella pilottialueella tutkittavina olevien mittausvälineiden käytön. Pilottialueilta saatujen kokemusten perusteella laitteiden toimivuutta ja käytännön kokemuksia on voitu kehittää. (Antinluoma ym., 2020)

Kuva 20. Metsäkeskuksen ja laitekehittäjän tuloksia mittaustarkkuudesta. (Antinluoma ym., 2020)

### Paikannustarkkuus TerraHärpillä

- Etäisyysmittauksen tarkkuus ~0.05 m
- Tukiasemaverkon RMSE 0.10 m
- Puiden sijainti 0.13 m RMS (paikallinen, taso)
- 99.5 % < 0.30 m
- GPS:n tarkkuustavoite 0.05 – 0.20 m
- Absoluuttinen sijaintitarkkuus < 0.5 m saavutettu
- 0.10 – 0.20 m abs. mahdollinen

#### 4.5 Korkeusmittari

Puuston pituuden mittaamiseen käytetään Haglöf Vertex korkeusmittaria (Kuva 21).

Mittauslaite sisältää erillisen transponderin. Laite käyttää ultraäänitekniikkaa, jonka ansiosta

laite toimii erinomaisesti myös tiheässä metsässä ja vaikeissa maasto-olosuhteissa. Laitetta käytetään myös erityisesti ympyräkoealan mittaamiseen. (Uittokalusto, n.d.)

Mittalaitetta käytettäessä laite on kalibroitava käyttöympäristön lämpötilaan sopivaksi, sillä lämpötila ja kosteus olosuhteet vaikuttavat ultraäänen kulkuun ilmassa. Laite kalibroidaan mittanauhaa apuna käyttäen tähtäämällä lähetinyksikköön, jolloin laite voi määrittää mitattavan matkan oikeaksi. Puuston korkeuden mittaamiseksi transponderi asetetaan puun kylkeen tarkasti rinnan korkeudelle ja itse mittaaminen suoritetaan riittävän etäältä, josta nähdään puun latvus selvästi. Mittaus suoritetaan mittaamalla etäisyys transponderiin ja sen jälkeen puun latvaan. Puun korkeuden määrittämiseksi laite käyttää sisäistä kulma-anturia, jonka avulla laite kykenee laskemaan tarkasti puun korkeuden.

Kuva 21. Haglöf Vertex korkeusmittari ja transponderi. (Uittokalusto, n.d.)



## 5 Aineiston käsittely

Puukartoilta mitattu aineisto lähetettiin tulkitsijalle (Terratec), jonne myös lähetettiin kulmapisteiltä tarkkaan mitatut koordinaatit. Näitä tietoja hyväksi käyttäen, tulkitsija korjasi puukartoilta muodostetut paikallisessa koordinaatistossa olevien puiden sijainnit tasokoordinaatistoon (euref\_fin\_tm35fin) sopivaksi (Kuva 22).

Mitattujen sijaintien ja oletettujen todellisten sijaintien estimaatit ajettiin paikkatietosovellukseen. Tässä tapauksessa käytössä oli ArcGis Pro. Paikkatietosovelluksessa valittiin kuviolla sopivat osajoukot yhteen. Sopiva osajoukko oli mitattujen sijaintien



muodostamat pisteet kartalla ja oletettu todellinen sijainti. Nämä osajoukot tarkastettiin vielä niin, että puustotiedot täsmäävät keskenään. Tässä tapauksessa tarkasteltiin lähinnä puiden läpimittaa ja pituus mitattujen puiden osalta, myös pituuden yhdenmukaisuutta. Tulkintaan vaikutti myös muut tunnuksset, kuten kuollut puu, pystykanto tai vinopuu. Osajoukot poimittiin Excel laskentataulukko-ohjelmaan. Excel laskentataulukko-ohjelmassa suoritettiin mittalaitteiston tarkkuuden Iskenta, jota kuvataan keskineliövirheellä (RMSE) ja harhalla (BIAS). Vertailu on suoritettu koeala kohtaisesti sekä kaikista vertailuna olevista mittauksista yhteensä.

Kuva 22. Tulkitsijan lähettämää puustotiedot ja koordinaatisto muunnokset teksti muodossa

```
JKUPUU;KoealaId;RyvasNro;KoealaNro;PuuId;PuuNro;X_local;Y_local;X_utm;Y_utm;Heading;Dx;Dy;Dx_rot;Dy_rot;X_utm_korj;Y_utm_korj;S
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150001;1;-0.011;3.201;399329.871;6785635.325;-325.08;-0.080;0.200;-0.180;0.118;399329.691;6785635.44
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150002;2;-0.362;3.241;399329.525;6785635.256;-50.00;-0.080;0.200;0.102;0.190;399329.627;6785635.446;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150003;3;-0.185;3.513;399329.609;6785635.569;-139.94;-0.080;0.200;0.190;-0.102;399329.799;6785635.44
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150004;4;-0.051;3.410;399329.769;6785635.512;-233.08;-0.080;0.200;-0.112;-0.184;399329.657;6785635.44
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150005;5;3.507;7.754;399331.827;6785640.734;-57.32;-0.121;0.200;0.103;0.210;399331.930;6785640.944;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150006;6;4.276;9.966;399331.882;6785643.075;-75.68;-0.099;0.200;0.169;0.145;399332.051;6785643.220;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150007;7;4.788;13.939;399331.155;6785647.014;-58.77;-0.153;0.200;0.092;0.235;399331.247;6785647.249;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150008;8;6.219;19.275;399330.885;6785652.530;-70.49;-0.106;0.200;0.153;0.167;399331.038;6785652.697;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150009;9;6.114;19.733;399330.644;6785652.934;-65.20;-0.090;0.200;0.144;0.166;399330.788;6785653.100;
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150010;10;6.293;19.826;399330.787;6785653.077;-115.22;-0.115;0.200;0.230;0.019;399331.017;6785653.07
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150011;11;7.508;19.655;399331.995;6785653.286;-62.36;-0.109;0.200;0.127;0.189;399332.122;6785653.47
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150012;12;8.713;21.471;399332.587;6785655.383;-85.78;-0.099;0.200;0.192;0.113;399332.779;6785655.49
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150013;13;10.107;23.128;399333.407;6785657.387;-55.35;-0.107;0.200;0.104;0.202;399333.511;6785657.5
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150014;14;9.378;26.169;399331.783;6785660.058;-70.87;-0.159;0.200;0.137;0.215;399331.920;6785660.27
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150015;15;11.469;27.973;399333.222;6785662.415;-92.13;-0.128;0.200;0.205;0.120;399333.427;6785662.5
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150016;16;11.858;29.290;399333.190;6785663.787;-90.34;-0.124;0.200;0.201;0.123;399333.391;6785663.9
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150017;17;13.842;30.631;399334.668;6785665.671;-80.24;-0.119;0.200;0.177;0.151;399334.845;6785665.8
JKUPUU;20101500;1015;0;2010150018;18;13.086;37.560;399333.035;6785660.313;-102.75;-0.131;0.200;0.230;0.070;399334.150;6785660.3
```

## 5.1 RMSE ja RMSEP

Keskineliövirheen neliöjuuri (engl. *root mean square error*, RMSE) on usein käytetty mitta tilastollisten tunnusten vertailuarvona. Keskineliövirhettä käytetään tässä tapauksessa kuvaamaan, mitattujen sijaintien tarkkuutta. Tulos on tarkka, kun osumat ovat lähekkäin, jolloin RMSE luku on pieni. Vastaavasti RMSE luvun ollessa suuri ja osumat selvästi toisistaan erillään, tulos on epätarkka (Kuva 23, s. 39).

RMSE arvon saavuttamiseksi käytettiin tasomittauksen keskineliövirheen neliöjuurta RMSEP (engl. *root mean square error of planimetry*) (Kaava 1). RMSEP on säde, joka määrittää ympyrän, jonka sisällä todellinen arvo on annetulla varmuudella. Tasomittauksen keskihajonta saadaan laskemalla yhteen X- ja Y- koordinaattien erotukset korotettuna toiseen potenssiin ja ottamalla tuloksesta neliöjuuri, joka jaetaan lopuksi mittauksen

lukumäärällä. Kaava on teksti muotoon avattuna seuraavanlainen: Neliöjuuri ((vertailtava X - mitattu X)<sup>2</sup> + (vertailtava Y - mitattu Y)<sup>2</sup>) / mittausten lukumäärä.

Kaava 1. Tasomittauksen keskineliövirheen, RMSEP-kaava. (Digi- ja väestötietovirasto, 2020, s. 21)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_{mi} - x_t)^2 + (y_{mi} - y_t)^2]}$$

(RMSEP = root mean square error of planimetry)

---

## 5.2 BIAS

Harha (BIAS), on tilastollista luotettavuutta kuvaava tunnus. Tunnus on harhainen, kun otokset poikkeavat systemaattisesti ohi oletetun keskipisteen. Vastaavasti tunnus on harhaton, jos otokset poikkeavat satunnaisesti, jolloin otokset kompensoivat toisiansa (Kuva 23, s. 39).

Harhaisuuden selvittämiseksi, lasketaan todellisten sijaintien keskiarvosta vähentämällä mitattujen sijaintien keskiarvo (keskiarvo vertailtava X – keskiarvo mitattu X) (Kaava 2). Tämä suoritetaan sekä X - ja Y – koordinaateille erikseen, jolloin saadaan harhaisuus selvitettyä sekä vaaka- että pystyakselilla.

Kaava 2. Harhan kaava (Niemi ym., 2020, s. 93)

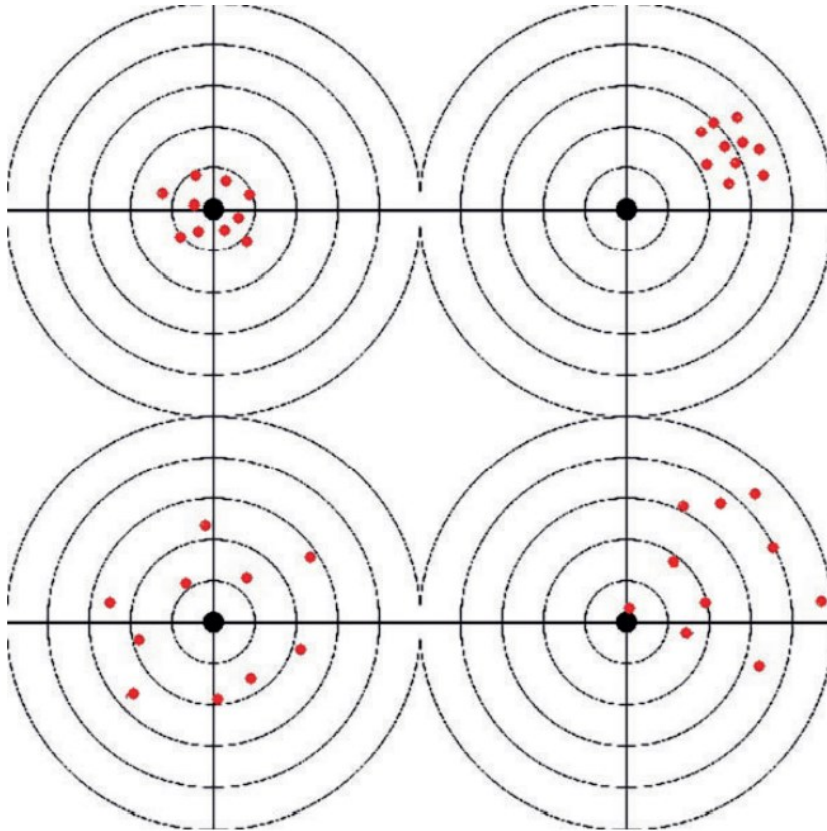
**Harha** 
$$bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

$n$  = havaintojen lukumäärä

$y_i$  = havaittu arvo kohteessa  $i$

$\hat{y}_i$  = estimoitu arvo  $y$  kohteessa  $i$

Kuva 23. Havainto esitys kuvaa sijaintien tarkkuutta ja harhaa. Tulokset ovat ylemmissä tauluissa tarkkoja (pieni RMSE) ja alhaalla epätarkkoja (iso RMSE). Vastaavasti vasemmalla olevissa tauluissa harhattomia (BIAS keskiarvoisesti lähellä keskustaa eli nollaa) ja oikealla harhaisia (BIAS poikkeaa systemaattisesti nolasta). Ylhäällä vasemmalla olevassa taulussa on paras tulos (tarkka ja harhaton) (Niemi ym., 2020, s. 84)



## 6 Mittaustulokset

Tässä tutkimuksessa on selvitetty puukarttakoealalla käytettävän mittalaitteiston sijaintitarkkuutta yksittäisten puiden osalta sekä koealatasolla keskineliövirhettä (RMSE) ja harhaa (BIAS). Mitattuja puiden sijainteja on verrattu koealoilta maastolaserilla mitattuihin puiden sijainteihin, joita pidetään tarkkoina.

Evonn koealaverkon tunnuksilla olevista koealoista vertailuaineistona olivat koealat:

- 1015 – Rämemännikkö.
- 1041 – Sekapuusto
- 1123 – Järeitä puita, alikasvoksella.
- 2028 – Korpikuusikko
- 2033 – Männikkö
- 2092 – Kuusikko

Yhteenveto vertailtavina olleiden koealojen tuloksista tuotti keskineliövirheeksi eli RMSE:ksi 0,325 metriä, jossa suurin poikkeama sijainnissa oli 1,892 metriä ja pienin 0,005 metriä. BIAS eli harha oli X eli vaaka-akselilla -0,047 metriä ja Y eli pysty akselilla -0,091 metriä (Kuva 24).

Kuva 24. Yhteenveto tuloksista.

Neliöllinen keskivirhe, RMSE	0,325
Suurin poikkeama sijainnissa	1,892
Pienin poikkeama sijainnissa	0,005
	X                  Y
Harha, BIAS	-0,047      -0,091

Osa mittauksista on suoritettu senkaltaisissa puustoissa, joissa ei tavanomaisesti tehtäisi puukarttakoealamittauksia, puuston tiheyden ja rakenteen perusteella. Tällä perusteella Metsäkeskus on jättänyt osan mittausaineistosta käyttämättä omassa tuloslaskennassaan.

Muutamissa havainnoissa on myös sen kaltaisia virheitä, joissa on syytä epäillä vertailtavana olevan pohja-aineiston luotettavuutta. Näissä mittaushavainnot ovat järjestelmällisesti sijoittuneet harhaisesti oletetun pisteen ulkopuolelle. Lisäksi vinoksi luokitelluissa puissa esiintyy lievää epävarmuutta sijainnin todelliseen pisteeseen.

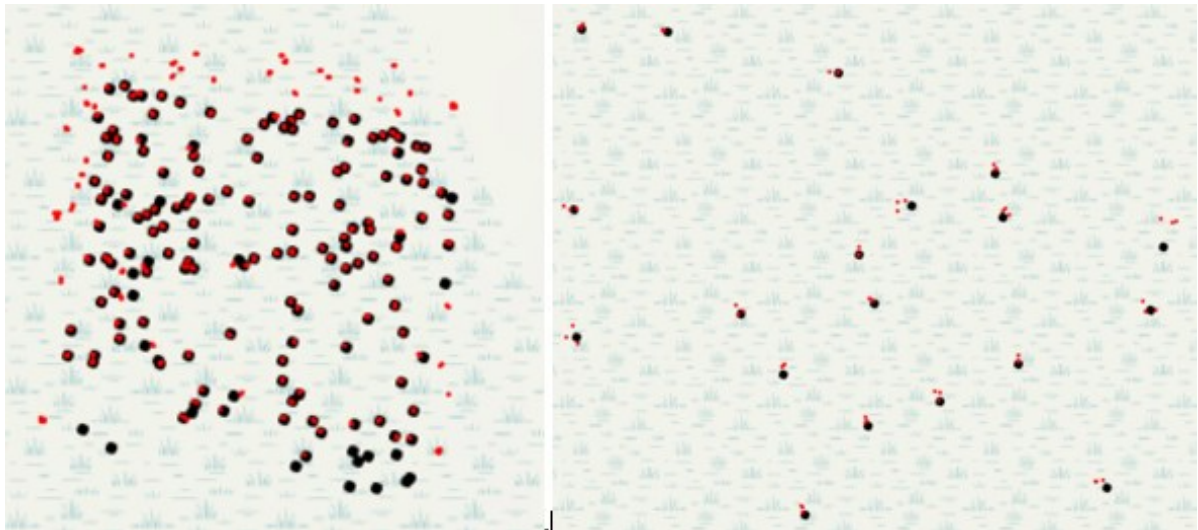
Tuloksista on lisäksi havaittavissa pieniä, mahdollisesti mittaajasta johtuvia virheitä. Mittaajasta johtuvat virheet voisivat olla sen kaltaisia, joissa mittaaja on liikuttanut mittalaitetta puun ympäriltä jo ennen mittauksen lopullista valmistumista. Mahdollisen virheen saattaa havaita muista osajoukon havainnoista erillään olevana havaintona.

## 6.1 Koeala 1015 – Rämemännikkö

Koeala sijaitsi ojittamattomalla kuivahkolla rämeellä ja puusto koostui pääsääntöisesti männystä. Näkyvyys ja kuuluvuus on koealalla hyvä tiheästä puustosta huolimatta. Puustoa mitatulla koealalla kertyi vertailtavaksi 147 kpl, joka vastaa noin 1435 puuta hehtaarille. Puusto oli läpimitaltaan 11,7 senttimetriä ja pituudeltaan 12,2 metriä.

Puukarttana koealalta mitattiin huomattava määrä puita, jotka eivät verttailu aineistossa ole mukana. Vertailun ulkopuolelle jääneet puut sijaitsevat koealan reunoilla (Kuva 25).

Kuva 25. Koeala vasemmalla kokonaisuudessaan ja oikealla lähennetty. Mustat pisteet oletettuja puiden sijainteja, punaisella mitattuja puiden sijainteja.



Puukartalla mitattujen puiden sijainnit ovat keskenään hyvin sijoittuneet ilman suuria heittoja. Kuvion keskivaiheilla vyöhyke, jossa on syntynyt hieman useammin epätarkkuutta, vertailuaineistoon nähden. Suurin poikkeama sijainnissa oli 1,12 metriä. Pienin poikkeama sijainnissa oli 0,01 metriä.

Mittausten tuloksena muutamista suurista poikkeamista huolimatta RMSE on 0,239. Tulos kuvastaa hyvää tarkkuutta. BIAS eli harha oli kuvion X – akselilla eli vaaka suunnassa 0,068 ja Y – akselilla eli pysty suunnassa 0,070 (Kuva 26). Yksittäisen puun osalta tulokset ovat usein hieman harhaisia, mutta tarkasteltaessa koealatasolla tulos on melko harhaton.

Kuva 26. Kuvion 1015 havainnekuva ja mittaustulokset.



## 6.2 Koeala 1041 – Sekapuusto

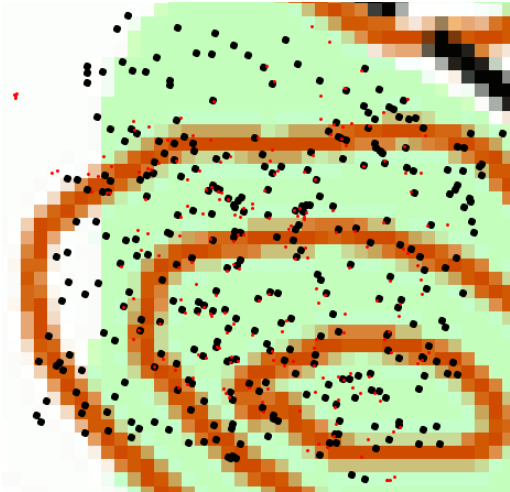
Sekapuustoinen koeala sijaitsi pienen kukkulan päällä, jossa oli hieman hankaluuksia saada tukiasemille riittävän kattavasti kuuluvuuksia, maaston muodosta ja puuston tiheydestä johtuen (Kuva 27). Mitattavia puita koealalla oli 208 kappaletta, joka vasta noin 2031 puuta hehtaarilla. Mitattu puusto oli läpimitaltaan 11,2 senttiä, sekä aiempien puusto tietojen mukaan koealan puuston pituus olisi vuonna 2019 ollut keskimäärin 14,2 metriä.

Puusto oli koealalla paikoin hyvin tiheää ja kantovesoista kasvaneita puita, jotka vaikeuttivat huomattavan paljon aineiston käsittelyssä puiden tulkintaa. Puut olivat lähekkäin ja useat kallellaan sekä saman vahvuisia, joka tuotti hankaluuksia aineiston tulkinnassa. Tällä kuviolla oli mittaussaineistosta lähes mahdoton tulkita luotettavasti puiden sijainti.

Kyseiseltä kuviolta ei tavallisesti mitattaisi puukarttakoealaa, eikä kyettäisi rajaamaan latvuksia selkeästi. Tämä oli siitä huolimatta erinomainen kohde tutkia, miten laitteisto käyttäytyy.

Evon koealoilla maastolaser kuvauksia vetänyt yliopistotutkija Ville Kankare mainitsee Hämeen ammattikorkeakoululla vetämässään luennossa (henkilökohtainen tiedonanto, 1.9.2021), että koeala 1041, on TLS mittaamisen kannalta hyvin vaikea huonon näkyvyyden kannalta. Kuvio on pienen mäen päällä ja hyvin puskainen. Kankare mainitsee myös, että kuvio on myös perinteisesti mittasaksilla hyvin hankala mitattava, koska on paljon juuri viiden sentin ylittäviä puita.

Kuva 27. Koealan 1041 havainnekuva.



Koealalla osoittautui hyvin hankalaksi yhdistellä mitattuja sijainteja oletettujen puiden sijainteihin. Ajan puutteen ja ristiriitaisten tulosten valossa, koealan tulosten laskentaa ei koettu järkeväksi saattaa loppuun.

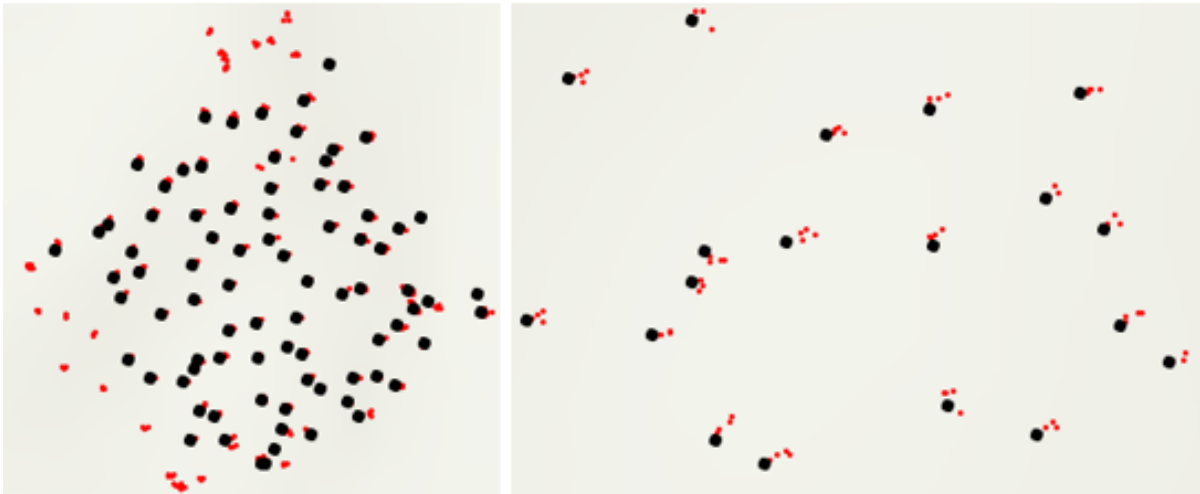
### 6.3 Koeala 1123 – Järeitä puita, alikasvoksella

Puusto oli koealalla pääsääntöisesti järeätä kuusta ja mäntyä, jossa alikasvoksia. Mitatun puuston keskimääräiseksi läpimitaksi muodostui 23 senttiä ja pituudeksi 20,5 metriä. Luvut kuvastavat hyvin puuston järeyttä, sillä alikasvos on laskenut järeän puun tuomaa arvoa alas. Koealalla oli läpimitaltaan jopa 50 senttisiä puita. Puustoa koealalla oli 111 kappaletta, joka vastaa noin 1084 puuta hehtaarille.

Tällä koealalla oli vaikeuksia saada RTK paikannusta huonojen satelliittihavaintojen takia. Koeala oli melko jyrkässä rinteessä, joka osaltaan vaikutti kuuluvuuteen. Myös tukiasemien sijoittelussa oli oltava erityisen tarkka sadakseen riittävästi havaintoja jokaiselle puulle.

Puukarttana koealalta mitattiin useita puita, jotka eivät vertailu aineistossa ole mukana. Vertailun ulkopuolelle jääneet puut sijaitsevat koealan reunoilla (Kuva 28). Koealan sisällä mitatut puut, jotka eivät ole vertailu aineistossa, ovat vasta täyttäneet viiden sentin lukupuun rajan.

Kuva 28. Koeala vasemmallla kokonaisuudessaan ja oikealla lähennetty. Mustat pisteet oletettuja puiden sijainteja, punaisella mitattuja puiden sijainteja.



Puukarttana mitattujen puiden sijainnit ovat melko hyvin keskenään linjassa. Suurimmat heitot mittauksiin on tapahtunut toisella ja kolmannella mittauskerralla. Toinen mittaus on tehty aamupäivällä ja kolmas mittaus iltapäivällä, jolloin mittauksen ajankohdalla ei vaikuttaisi olevan yhteyttä isompaan hajontaan. Syy yhteys saattaisi löytyä mittaajasta.

Suurin epätarkkuus mittaus sijainnissa on tullut pahasti kallellaan olevasta puusta, joka voi osaltaan korostaa virheen mahdollisuutta. Suurin poikkeama sijainnissa on 1,397 metriä ja vastaavasti pienin poikkeama sijainnissa on 0,022 metriä. Pienimmän poikkeaman sijainti on poikkeava toisiin mittauksiin nähden samalla puulla, jääden X ja Y suunnassa eripuolelle tarkaksi oletetun sijainnin. Koealan neliöllinen keskivirhe on 0,466 metriä (Kuva 29)

Mittaus tuloksia tarkasteltaessa kuvista 30 ja 31, kiinnittää huomiota mittausten lähes järjestelmälliseen sijaintiin, joka kulkee rinteän suuntaisesti. Koealalla on harhaa vaaka suunnassa -0,277 metriä ja pysty suunnassa -0,147 metriä (Kuva 29)



Kuva 29. Koealan 1123 pohjakartta ja mittaus tulokset.

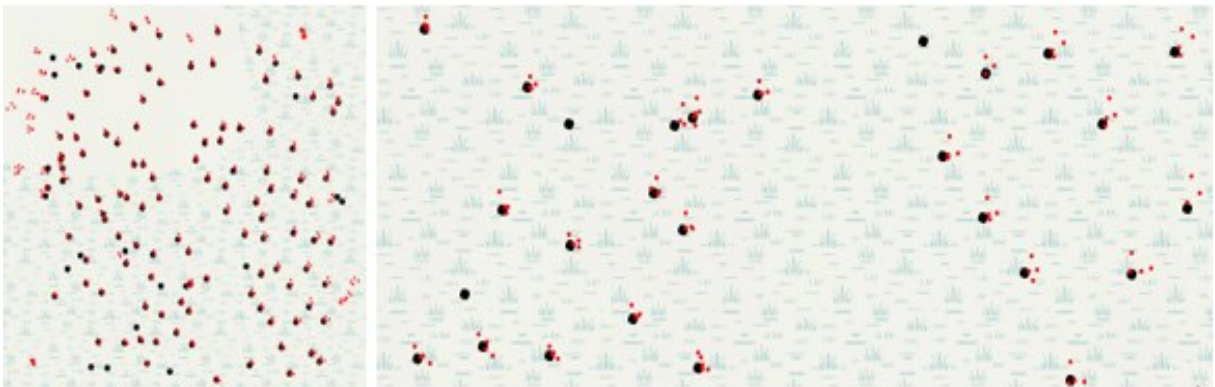


#### 6.4 Koeala 2028 – Korpikuusikko

Koeala sijaitti tiheässä korpikuusikossa, jossa kasvoi myös muutama hieskoivu. Koealalla oli huomattavia vaikeuksia saada tuotettua RTK paikannusta. Mitattavia puita koealalle muodostui 136 kpl, joka vastaa noin 1309 puuta hehtaarille. Mitattavien puiden keskipituudeksi muodostui noin 18,2 metriä ja läpimitan ollessa 18,4 senttimetriä.

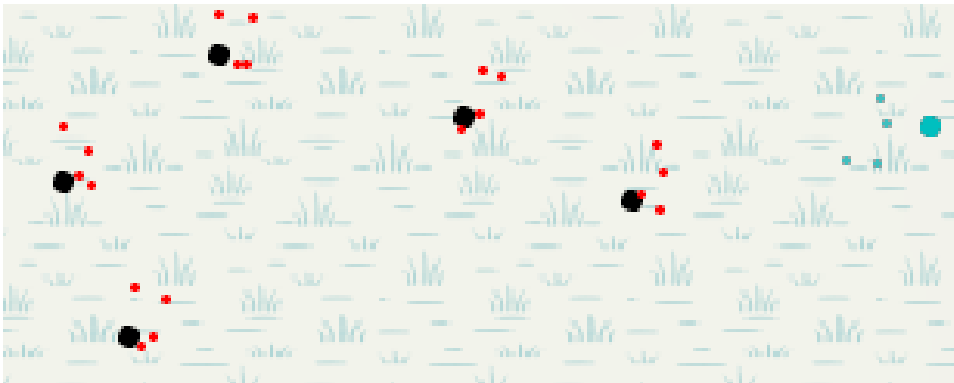
Koealaa halkoo ajoura, joka myös jakaa mittaushavaintojen suuntaa. Mittaushavainnot ovat puutasolla hyvin ryppäissä, mutta pohja aineistoon nähden syntyy hieman heittoa. Luoteiskulmasta löytyy suurimmat sijainti virheet. Jossa mitatut sijainnit sijaitsevat oletetun tarkan sijainnin länsipuolella (Kuva 30). Havainnoissa korostuu myös, että toisella mittauskerralla on syntynyt pääsääntöisesti suurimpia sijainti virheitä.

Kuva 30. Koeala vasemmalla kokonaisuudessaan ja oikealla lähennetty. Mustat pisteet oletettuja puiden sijainteja, punaisella mitattuja puiden sijainteja.



Mielenkiintoinen havainto on myös itäreunassa oleva järeä kuusi, josta mitatut sijainnit ovat sijoittuneet täysin päinvastoin kuin muissa saman alueen puissa (Kuva 31). Erikoista on myös se, että kyseistä järeätä kuusta ei ole havaittu vuoden 2014 mittauksissa.

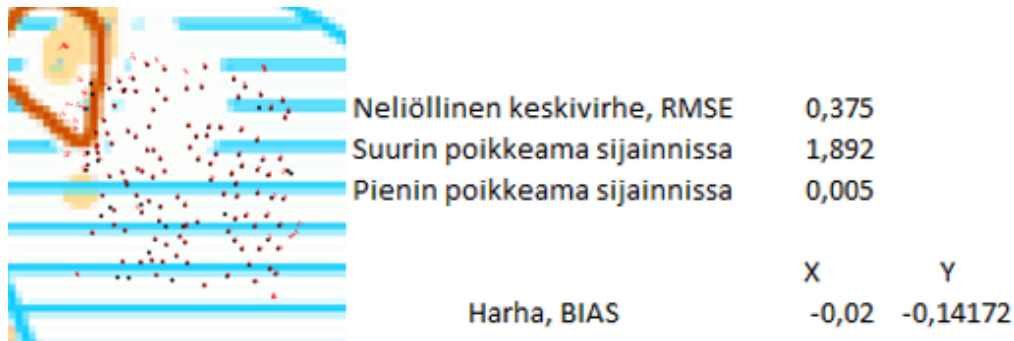
Kuva 31. Oikealla järeä kuusi sekä havainnot merkitty turkoosilla värillä, osoittavat poikkeuksellista havaintoa muihin nähden.



Suurin poikkeama sijainnista on 1,892 metriä, joka on kuvion luoteiskulmassa olevassa puussa. Luoteiskulmassa myös viereisillä puilla vastaavasti suuria sijaintipoikkeamia (Kuva 30. vas.). Mittaushavainnot sijoittuvat näissä kuitenkin keskenään hyvin. Luoteiskulmassa on tiheää puustoa ja näkyvyyttä haittaavaa alikasvosta paljon. Tukiasemahavaintoja alikasvos ei kuitenkaan haittaa, joita kertyikin vähintään 12–15 kappaletta joka kerta.

Pienin poikkeama sijainnista on 0,005 metriä ja koko koealan neliöllinen keskivirhe eli RMSE on 0,375 metriä. Harhaa (BIAS) vaakatasossa (X-akselille) ei juurikaan muodostunut (0,02), vaikka yksittäisillä puutasoilla sitä on selvästi havaittavissa. Pystylinjassa (Y-akselilla) harhaa muodostui -0,14 metriä (Kuva 32), joka kuvastaa, että havainnot ovat hieman oletetun tarkan sijainnin yläpuolella.

Kuva 32. Koealan 2028 pohjakartta ja mittaustulokset.



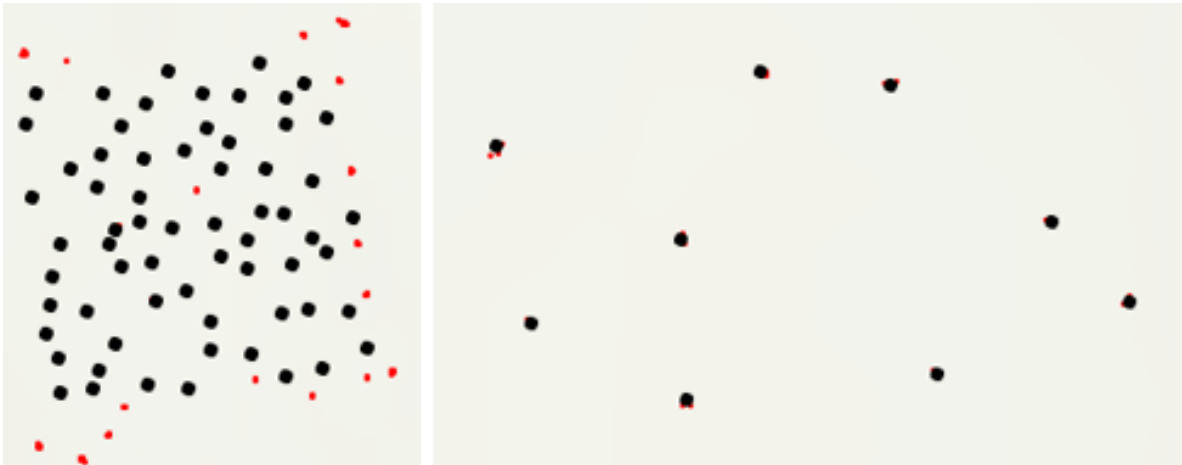
## 6.5 Koeala 2033 – Männikkö

Koeala on lähes puhdas männikkö kuivahkolla kankaalla. Puusto on harvaa ja hyvin selkeä piirteistä, sekä tasapituista. Kuuluvuudet olivat hyvät RTK paikannukseen sekä tukiasemien sijoitteluun.

Puuston pituus oli keskimäärin 19,8 metriä ja läpimitta 21,5 senttiä. Koealalle muodostui 78 kappaletta mitattavia puita, joka vastaa noin 762 puuta hehtaarilla.

Puukarttakoealana mitattiin ylimääräisiä puita koealan itä- ja eteläreunasta. Myös yksi puuhavainto muodostui koealan keskelle, jota ei vertailtavana olevassa TLS-aineistossa ole vielä huomioitu. Kuvaa 33 katsottaessa voi havaita, että kuvassa ei näy paljoakaan punaisia havaintopisteitä mustien oletettujen sijaintipisteiden ympärillä.

Kuva 33. Koeala vasemmalla kokonaisuudessaan ja oikealla lähennetty. Mustat pisteet oletettuja puiden sijainteja, punaisella mitattuja puiden sijainteja.



Koealalla havainnot ovat sijoittuneet erittäin hyvin pohja-aineiston kanssa yhteen. Suurin poikkeama sijainnissa oli 0,600 metriä. Tästä suurimman virhe sijainnin puusta oli myös muut mittaukset lähes yhtä kaukana, oletetusta sijainti pisteestä. Tämä viittaisi pohja-aineistossa olevaan virheeseen. Lisäksi yksittäisiä hieman poikkeavia havaintoja on kirjautunut, jotka saattavat johtua mittaajan toiminnasta.

Pienin poikkeama sijainnissa oli 0,011 metriä ja neliöllisen keskivirheen eli RMSE:n arvoksi muodostui 0,130 metriä koko kuvion tasolla. Koealan havaintoja voisi luonnehtia harhattomiksi, sillä vaaka - akselilla -0,020 metriä ja pysty akselilla -0,001 metriä (Kuva 34).

Kuva 34. Koealan 2033 pohjakartta ja mittaustulokset.



Neliöllinen keskivirhe, RMSE	0,130
Suurin poikkeama sijainnissa	0,600
Pienin poikkeama sijainnissa	0,011

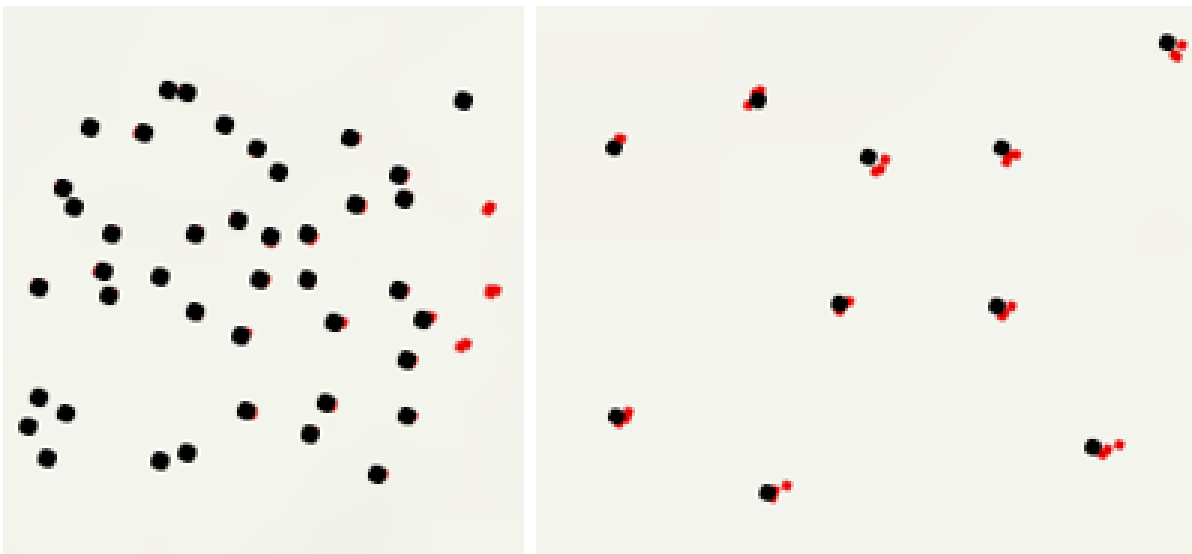
	X	Y
Harha, BIAS	-0,020	-0,001

## 6.6 Koeala 2092 – Kuusikko

Koeala oli tasaikäisrakenteinen tuoreenkankaan kuusikko, joka sijaitsi lievässä rinteessä (Kuva 36). Mäkinen maasto aiheutti tukiasemien sijoittelussa huolellisuutta. Puusto oli harvaa uudistuskypsää kuusikkoa, jossa muutama järeä koivu. Koealalla oli 39 puuta, joka vastaa noin 381 runkoa hehtaarille. Mitattujen puiden keskimääräinen pituus oli 22,6 metriä ja läpimitta 27,9 senttiä.

Puukarttakoealana mitattiin muutama ylimääräinen puu koealan itäreunasta. Kuvasta 35 voi hyvin vahavaita punaisella mittaushavaintojen olevan hyvin oletettujen sijaintien läheisyydessä.

Kuva 35. Koeala vasemmalla kokonaisuudessaan ja oikealla lähennetty. Mustat pisteet oletettuja puiden sijainteja, punaisella mitattuja puiden sijainteja.

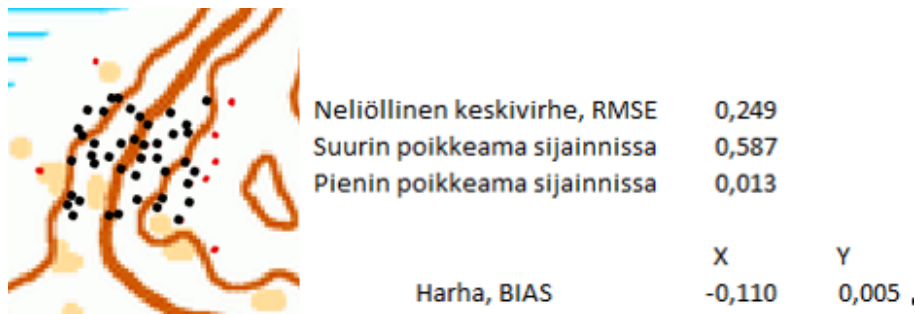


Tarkemmin koealan mittaushavaintoja tarkasteltaessa voi havaita, että toisella mittauskerralla on useimmiten tullut hieman huonompia osumia oletettuun sijaintiin, kuten kuvan 35 oikeanpuoleisesta alareunasta voi havaita.

Suurin poikkeama sijainnissa on 0,587 metriä. Suurin poikkeama tullut keskivaiheilla olevasta puusta, jonka voi havaita jopa kuvan 35 vasemman puolen keskivaiheilla. Pienin poikkeama sijainnissa oli 0,013 metriä ja neliöllisen keskivirheen eli RMSE:n arvoksi muodostui 0,249

metriä koko kuvion tasolla. Harhaa koealalla oli vaaka-akselilla -0,110 metriä, joka on havaittavissa myös kuvassa 35. Pystysuunnassa havainnot olivat 0,005 metrin tarkkuudella kohdillaan (Kuva 36), jota voisi luonnehtia harhattomaksi.

Kuva 36. Koealan 2092 pohjakartta ja mittaustulokset.



## 7 Johtopäätökset ja pohdinta

Mittaukset onnistuivat hyvin, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Ongelmia syntyi koealoilla eniten RTK-paikannusten kanssa. Satelliittihavaintoja jouduttiin usein odottelemaan kohtuuttoman pitkään. Erityisen huonot satelliittihavainnot olivat koealoilla 1123 ja 2028. Koealojen pitkä ja tiheä puusto sekä pilvinen ja huono sää vaikeutti satelliittihavaintojen saantia. Ajankohdalla ei havaittu olevan merkitystä, että suoritettiin mittausta aamu- vai iltapäivällä. Matkapuhelimen ja saksien välinen yhteys katkesi muutaman kerran, jonka takaisin tuottaminen tuotti aluksi hieman harmaita hiuksia. Yhteys katkesi tilanteissa, joissa poistettiin saksien luota tekemään mittausten välissä jotakin muuta, jolloin bluetooth yhteyden kantomatka ei enää riittänyt saksien ja matkapuhelimen välissä. Tässä voisi auttaa saksien kahvaan asennettava puhelinteline, josta mittausta olisi samalla hyvä seurata kaivelematta puhelinta taskusta. Mittasakset itsessään olivat erittäin miellyttävät ja tasapainoiset käyttää kahden kahvan ansiosta.

Tukiasemien (16 kpl) päivittäinen lataus oli melko työläs prosessi. Latausta varten oli jokaisesta tukiasemasta pyöritettävä tiiviit kierrekorkit pois, jotta saatiin tukiasemien akut poistettua ja asennettua lataukseen yön ajaksi. Tähän tulisi kehittää jokin käytännöllisempi

ratkaisu, esimerkiksi langaton latauslaite tai pistoke suojäläpän alle tukiaseman pohjaan. Toki myös sakset ja tallennin oli ladattava päivittäin. Tukiasemat olivat kevyitä ja ne olivat helppoja ripustaa maastoon.

Tulosten laskennan mahdollistamiseksi oli paikkatieto-opinnoista erityisesti hyötyä. Itse laskenta suoritettiin Excel-pohjalla, jossa oli huolehdittava tulosjoukkojen hallinnasta ja yhdistämisestä, niin että laskentaan ei päädy samoja arvoja useampaan kertaan.

Tulosten analysointi ja mahdollisten virhelähteiden tutkiminen herätti kovasti mielenkiintoa perehtyä aiheeseen, sillä vertailtavana olevan pohja-aineiston tarkkuus nosti epäluottamuksen mahdollisuuden esiin. Tuloksissa keskineliövirheet olivat keskimäärin oletettua suuremmat (RMSE 0,325).

Epäilyni, viitaten pohja-aineiston tarkkuuteen, johtivat selvittämään asiaa yliopistotutkija Ville Kankareelta. Hänellä on pitkä kokemus TLS-mittauksista Evon koealoilla. Sähköpostiviestissään (henkilökohtainen tiedonanto, 10.10.2022) Kankare kertoo, että:

Vertailuaineistona käytetyt TLS, maastolaserilla tuotetut puukartat perustuvat RTK-GPS tietoon, joiden sijaintitarkkuus pitäisi olla cm-luokkaa. Pohja-aineistossa on kuitenkin puita, jotka eivät ole näkyneet TLS-kuvauksessa ja ne on mitattu miestyönä. Näille puille määritettiin sijaintitiedot mittaamalla suuntia ja etäisyyksiä TLS pistepilvistä tunnistetuista puista, useammasta eri suunnasta. Näissä saattaa olla mittaajasta johtuvaa epävarmuutta. Pistepilvistä mitatut puut on numeroitu ID  $\geq$  1000.

Aineistoa keskustelun jälkeen tutkiessani havaitsin nimenomaan näissä, tunnisteella ID  $\geq$  1000 kyseenalaisimmat havaintovirheet.

Kaukokartoituksen johtava asiantuntija, Seppo Kilpiäinen, Metsäkeskuksesta mainitsee sähköpostiviestissään (henkilökohtainen tiedonanto, 12.11.2021) seuraavaa:

Muunnettaessa paikallisesta koordinaatistosta tasokoordinaatistoon on käytetty 2D muunnosta, joka voi osaltaan selittää huonompia tuloksia niillä koealoilla, joissa

on rinnettä. 3D muunnoksella olisi voinut päästä tarkempiin mittaus tuloksiin näillä koeloilla.

Lisäksi mittaajasta johtuvaa epätarkkuutta on voinut syntyä, mittaajan siirtäessä mittalaitetta ennen mittaustuloksen valmistumista. Mittalaitetta tulisikin pitää huolellisesti paikoillaan, kunnes matkapuhelinsovellus antaa merkin. Kiirehtimällä seuraavaan mittaukseen, sijainnin paikannus saattaa antaa virheellisen tuloksen.

Näistäkin huolimatta tulokset osoittavat riittävää tarkkuutta harvapuustoisilla koeloilla, joita puukartoissa yleisesti käytetään. Tulokset osoittavat myös, että mittalaite kykenee tuottamaan melko tasaista tulosta myös tiheämmässä puustoissa. Suodattamalla kyseenalaiset virhelähteet aineistosta, saataisiin tuloksista vertailukelpoisemmat ja totuuden mukaisemmat. Suodattamisen myötä mitattavana olleet suureet osoittaisivat parempaa sijainnin paikannusta.

Kerätyllä aineistolla tutkimusta voisi syventää tarkemmin yksittäisen puun tasolle sekä vertailla mittausten keskinäistä hajontaa tarkemmin. Koeloilta on mitattu useita puita, joille ei ollut puustotietoja vertailu aineistossa (olivat koealan ulkopuolella). Näistä havainnoista tulisi lisää aineistoa jatkotutkimukseen mittaustulosten tarkempaa analysointia varten. RTK:lla tarkkaan mitattujen kulmapisteiden sijainnista on useita havainto mittauksia, joita tässä ei ole myöskään tutkittu. Lisäksi koealakohtaisesti poistamalla laskennasta puut ( $ID \geq 1000$ ), joita ei ole tarkkaan sijoitettu TLS-kuvauksessa, RTK-sijainti paikannuksen avulla. Myös vinot puut olisi hyvä poistaa tarkemmasta analysoinnista. Puustotunnuksista olisi läpimittaa mahdollista tarkastella hieman tarkemmin TLS aineistoon nähden. Nyt silmämääräisenä havaintona olen kiinnittänyt huomion useamman puun kohdalla TLS aineiston pieneen yliarvioon puiden läpimitan suhteen.

Opinnäytetyö on opettanut pitkäjänteistä tutkimista, jossa monista eri lähteistä hankittua tietoa yhdistelemällä päästään hyvään lopputulokseen. Työn alkuvaiheessa oli jo pyrittävä muodostamaan kuva, miten saadaan mittaustuloksista tuotettua hyvät laskentamallit, sekä mitä niissä olisi huomioitava tarvittaviin tuloksiin päästäkseen. Metsäkeskuksen mittalaitteen hankintapäätöstä varten oli saatava RMSE ja BIAS koealatasolta sekä kaikilta



koelaitteita yhteensä, joka rajasi tutkimuksen sisältöä. Tutkimusta tehdessä olen päässyt soveltamaan paikkatiedon opintojani käytännössä sekä Excel- taulukkolaskennan ominaisuuksia.

## Lähteet

Antinluoma, J., Lamminaho, A., Tenhunen, T., (27.3.2020). *Puukarttojen mittaus*.

[Metsäkeskus] Metsäkeskus

Digi- ja väestötietovirasto, (28.9.2020). *Liite II: Laatumittarit, tasosijaintiepävarmuus*. [JHS

160 Paikkatiedon laadunhallinta] Digi- ja väestötietovirasto.

[https://www.suomidigi.fi/sites/default/files/2020-06/JHS160\\_liite2\\_0.pdf](https://www.suomidigi.fi/sites/default/files/2020-06/JHS160_liite2_0.pdf)

Geocenter. (n.d.). *Ilmalaserskannaus*. usein kysyttyä. [https://www.geocenter.fi/usein-](https://www.geocenter.fi/usein-kysyttya/)

[kysyttya/](https://www.geocenter.fi/usein-kysyttya/)

El Issaoui, A. (27.3.2017). *Pulssi- ja vaihe-erokeilaimen vertailu puustomittauksessa*.

[Diplomityö, Aalto-yliopisto].

[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25171/master\\_El\\_Issaoui\\_Aimad\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/25171/master_El_Issaoui_Aimad_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Heikkilä, J. (20.1.2022). *Pykälänverran parempaa metsävaratietoa*. [Blogi]. Metsäkeskus.

<https://www.metsaan-lehti.fi/blogi/juho-heikkila-pykalan-verran-parempaa-metsavaratietoa.html>

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, J., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R., Alho, P.

(2015). *Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa*. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu.

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/166765/GIS\\_kirja\\_kansineen\\_netti.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/166765/GIS_kirja_kansineen_netti.pdf?sequence=1)

Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. (2013) *Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa*.

Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu, Nro 5, Helsinki.

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42935/Laserkirja\\_painettu.pdf?sequence=2](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42935/Laserkirja_painettu.pdf?sequence=2)

Kantonen, M. (11.9.2014). *Laserkeilauksen hyödyntäminen Tuusulan kunnassa*. [kuva]

[Insinööriyö, Metropolia ammattikorkeakoulu]. Metropolia.

<https://tinyurl.com/37hnksrn>

Kouva, V. (2017). *Ilmalaserkeilainten kehitys*. [Opinnäytetyö, Lapin ammattikorkeakoulu].

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138649/Ville\\_Kouva.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138649/Ville_Kouva.pdf?sequence=1)

Maaninka, V. (2021). *Metsävaratietojen kaukokartoitusaineistojen luotettavuus ja hyödyntäminen* [Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu].

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/496409/Maaninka\\_Veikko.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/496409/Maaninka_Veikko.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Metsäkeskus. (n.d.). *Tiedonkeruu*. Metsäkeskus. <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietojen-yllapito/tiedonkeruu>

Metsäkeskus. (27.4.2018). *Puustotulkintakoealojen maastotyöohje*. [Metsäkeskuksen ohjeistus]. Metsäkeskus.

<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/koealojen-maastotyohje.pdf>

Metsäkeskus. (16.4.2021). *Metsävaratiedon laatuseroste*. Metsäkeskus.

<https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/metsavaratiedon-laatuseroste.pdf>

Metsäkeskus, (31.3.2022). *Metsävaratietojen laatu paranee hakkuukonetiedolla*. [uutinen].

Metsäkeskus. <https://www.metsakeskus.fi/fi/ajankohtaista/metsavaratietojen-laatu-paranee-hakkuukonetiedolla>

Metsälehti. (2.9.2022). *Finnmetko 2022: Ponsse toi laserkeilaimen hakkuukoneeseensa*.

[uutinen]. Metsälehti. <https://www.metsalehti.fi/uutiset/finnmetko-2022-ponsse-toi-laserkeilaimen-hakkuukoneeseensa/#c89f82d8>

MML. (n.d.-a). *Laserkeilaus- ja ilmakuvausalueet*. [kuva]. Maanmittauslaitos.

<https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus>

MML. (n.d.-b). *Laserkeilausaineisto 5p*. Maanmittauslaitos.

<https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantunnevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/laser-scanning-data-5-p>

MMM. (n.d.). *Metsävaratiedot*. Maa- ja metsätalousministeriö.

<https://mmm.fi/metsat/metsavaratiedot>

- Niemi, M., Mäkinen, A., Viitala, R., Lumperoinen, M. (2020). *Metsäsuunnittelun laskennan periaatteet – arvoja yhteensovittamassa*. [kuva]. Tapio
- Ovaskainen, H. (15.4.2019). *Kohti automaattista puunkorjuun laadun mittaamista*. [Metsätehon raportti]. Metsäteho Oy. <https://tinyurl.com/387vd76t>
- Rohrba, F. (14.10.2015). *Point density and spacing*. Felix Rohrba. <https://felix.rohrba.ch/en/2015/point-density-and-point-spacing/>
- Ruusunen, P. (2020). *Trestiman puustotulkinnan tarkkuus tarkkaan mitatuilla puukarttakoealoilla*. [Opinnäytetyö, Hämeen ammattikorkeakoulu]. Hämeen ammattikorkeakoulu. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335360/Ruusunen\\_Petri.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/335360/Ruusunen_Petri.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Räsänen, T. (22.1.2019). *Hakkuukonetiedon hyödyntäminen ja hakkuukonetietovarasto*. [seminaari] Metsäteho Oy. Metsätieto ja sähköiset palvelut –hankkeen lopputulosseminaari. <https://tinyurl.com/3fvn6dkm>
- Rönholm, P (n.d.-a) *Kartoitus laserkeilauksella*. [Luentomateriaali, Aalto yliopisto] Aalto yliopisto. <https://docplayer.fi/64643895-Kartoitus-laserkeilauksella.html>
- Rönholm, P. (n.d.-b) *Ilmalaseraineiston prosessointi*. [Luentomateriaali, Aalto yliopisto] Aalto yliopisto. <https://docplayer.fi/60363751-Ilmalaserkeilausaineiston-prosessointi.html>
- Sirro, L., Häme, L., Pitkänen, T. P., Hostikka, A., Törmä, M., Häme, T., Kangas, A., Rauste, Y., Huotari, R., Norppa, J. (2019). *Metsävaratiedon ajantasaistus – satelliittikuviin perustuva muutostulkinta*. [Metsätieteen aikakauskirja, Suomen metsätieteen seura]. <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/article/10260>
- Taivassalo, T. (2017). *Maalaserkeilauksen soveltaminen puuston arvonmäärittelyyn*. [Diplomityö, Aalto yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu]. Aalto yliopisto. [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/28010/master\\_Taivassalo\\_Tero\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/28010/master_Taivassalo_Tero_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Terratec. (n.d.). *Laserkeilaus*. Terratec Oy.

<https://terratec.fi/palvelut/ilmakuvantaminen/laserkeilaus/>

Uittokalusto. (n.d.). Haglöf Vertex - *korkeusmittari ja tranponderi*. [kuva].

<https://www.uittokalusto.fi/haglof-vertex-iv-gs-korkeusmittari-e536.html>