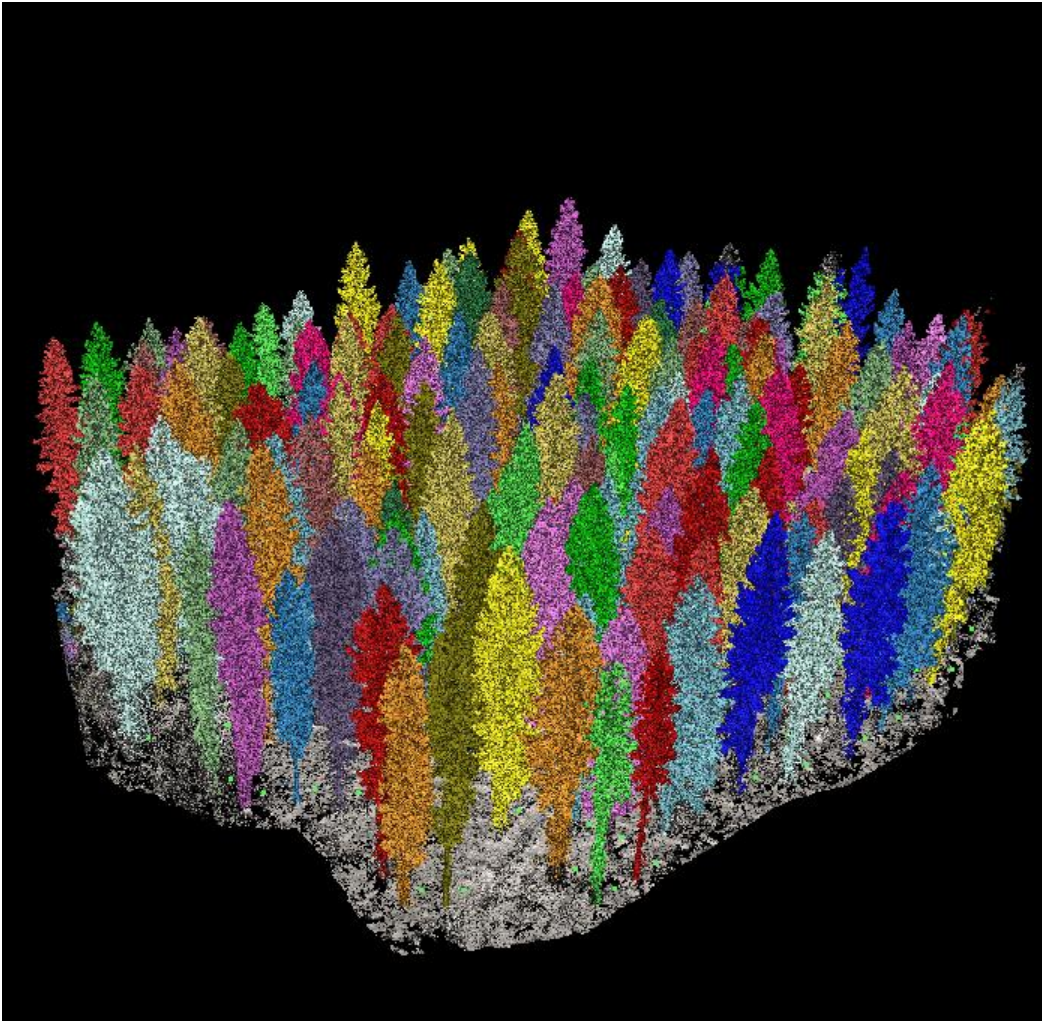




Maalaserkeilaus puu- ja metsikkötason tunnusten mittaamisessa – aineiston keruun optimoinnin ja operatiivisen toiminnan mahdollisuudet

Yhteenveto selvityksestä





MAALASERKEILAUS PUU- JA METSIKKÖTASON TUNNUSTEN MITTAAMISESSA – AINEISTON KERUUN OPTIMOINNIN JA OPERATIIVISEN TOIMINNAN MAHDOLLISUUDET

Yhteenveto selvityksestä

Selvityksen tekijä: Aapo Erkkilä
Itä-Suomen yliopisto
Luonnontieteiden, Metsätieteiden ja tekniikan tiedekunta
Metsätieteiden osasto

Tämä työ on toteutettu yhteistyössä Itä-Suomen yliopiston, Suomen metsäkeskuk-
sen ja Luonnonvarakeskuksen kanssa. Työn toteuttamisen on mahdollistanut
UNITE-lippulaiva ja Kestävästi tuotetun pienpuun saatavuuden parantaminen Poh-
jois-Karjalassa (KESSU) -hanke. Tässä dokumentissa on tiivistetty selvityksen sisältö
ja tärkeimmät tulokset. Selvitys julkaistaan kokonaisuudessaan myöhemmin otsi-
kolla ”Terrestrial laser scanning for measuring forest inventory attributes: implica-
tions towards data acquisition optimization and operational feasibility” alan kan-
sainvälisessä julkaisusarjassa.



Euroopan unionin
osarahoittama



POHJOIS-KARJALA
Maakuntaliitto



UNITE
JOHTAVAT, KESTÄVÄT JA KOKONAISUUSORIENTAATIOT



Metsäkeskus



Sisällys

1 Selvityksen tavoite	4
2 Aineistot	4
2.1 Perinteinen mittaus	4
2.2 Maalaserkeilaus	5
3 Menetelmät	7
3.1 Pistepilven prosessointi ja puutason mallinnus	7
3.2 Puu- ja metsikkötason tunnusten laskenta	7
3.3 Keilausverkon optimointi ja automaattinen tulkintatestaus	8
4 Tulokset	8
5 Johtopäätökset	10
Liite 1.	12

1 Selvityksen tavoite

Selvityksen tavoitteena oli testata maalaserkeilauksen mahdollisuuksia metsänmittauksessa kolmella tavalla:

- 1) Ensimmäisenä testattiin tiheällä keilausasetelmalla kerätyn maastolaseraineiston käyttöä puoliautomaattisessa puustotulkinnassa. Tulkinnassa muodostettiin yksittäisten puiden pistepilvet metsikkötason puustotunnusten ennustamiseen.
- 2) Toisena testattiin kullekin koealalle optimaalisen skannauskuvion mallintamista olettaen, että harvat metsiköt vaativat vähemmän skannaus eli asemapistettä pinta-alaa kohti kuin tiheät metsiköt.
- 3) Kolmanneksi arvioitiin mittausmenetelmän operatiivista toteutettavuutta soveltamalla täysin automatisoituja menetelmiä optimoiduista skannauskuviosta johdettuihin pistepilviin ja vertaamalla sen suorituskykyä puoliautomaattiseen lähestymistapaan.

2 Aineistot

2.1 Perinteinen mittaus

Selvityksen kohdealue oli Heinäveden operatiivinen inventointialue vuodelta 2023, josta Suomen metsäkeskus keräsi vuonna 2023 yhteensä 926 koealaa (puukartat ja kiinteäsäteiset) sekä operatiivista metsävaratiedontuotantoa, että Metsäkaksonen- ja Kuopus-kehittämishankkeita varten.

Maalaserkeilaustestiä varten aineistoista valittiin 50 aluetta hyvin edustavaa puukarttakoealaa. Ensimmäisenä perusjoukosta valittiin vain puukartat ja suodatettiin pois kohteet, joihin kohdistui tuore metsänkäyttöilmoitus. Tämän jälkeen maalaserkeilaukseen kohteet valittiin neljästä ryhmästä: pienpuukoealat, eri-ikäisrakenteiset koealat, kuolleen puun koealat ja operatiivisen inventoinnin koealat. Valinnassa hyödynnettiin valintakriteereinä valtapituutta, pohjapinta-alaa/runkolukua ja enemmistöpuulajia, jotta mukaan saatiin rakenteellisesti mahdollisimman erilaisia metsiköitä. Lisäksi valinnassa käytettiin asiantuntijahavaintoja operatiivisista mittauksista (esim. eri-ikäisrakenteisten kohteiden valinta).

Puukarttakoealoilta mitattiin kaikki lukupuut, joiden rinnankorkeusläpimitta oli > 5 cm. Lukupuilta määritettiin myös sijainnit paikantavaa mittasaksitekniikka hyödyntäen. Tämän lisäksi koealan koepuista määritettiin pituus ja ikä. Tavoitteena puukartoilta oli mitata yleensä 100–200 puuta, jonka takia koealan koko vaihteli puuston tiheyden mukaan.

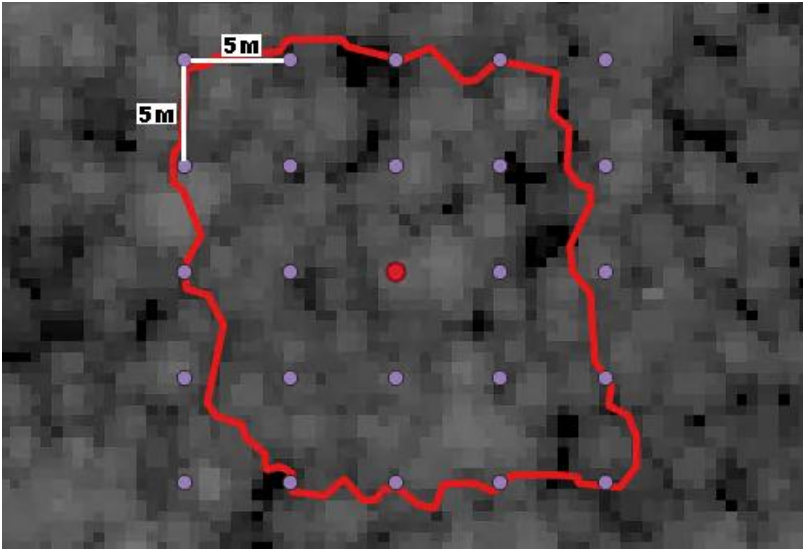
Tämän selvityksen tulosten tarkasteluissa koealat on jaettu edelleen kolmeen ryhmään: 1) mäntyvaltaiset, 2) kuusi-/lehtipuuvaltaiset ja 3) pienpuukohteet (sis. varsinaiset pienpuukohteet ja eri-ikäisrakenteiset kohteet).

2.2 Maalaserkeilaus

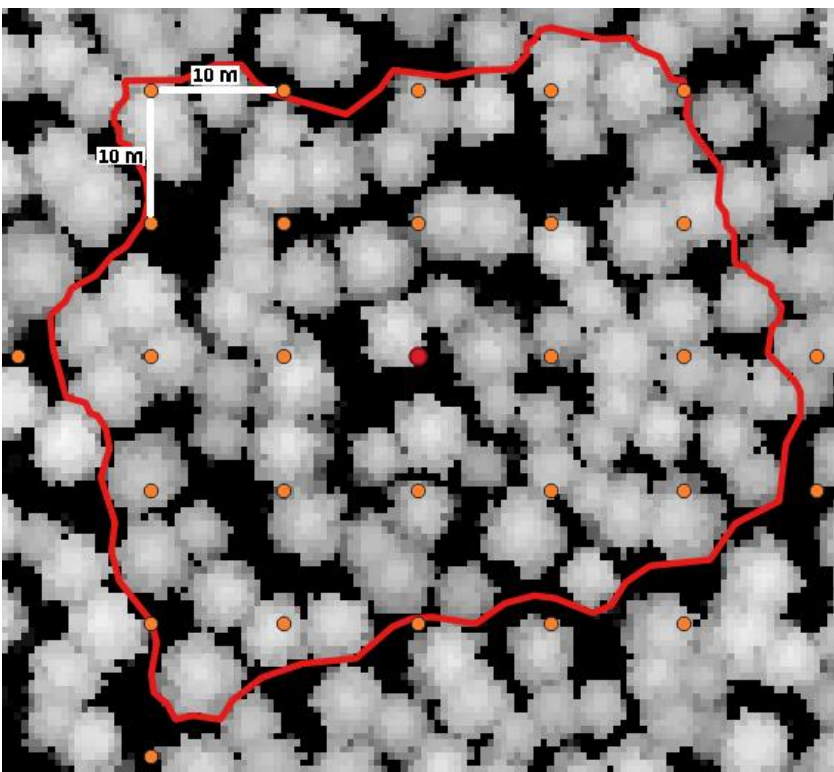
Kesällä 2024 toteutettiin maalaserkeilauskampanja valituilla 50 puukarttakoealalla. Mittaukset toteutettiin Riegl VZ-400i-maalaserkeilaimella (Kuva 1.). Skannaukset toteutettiin sijoittamalla skannaus- eli asemapisteen mitattaville kohteille ennakoon toimistolla suunniteltujen säännöllisten ruudukoiden perusteella (kts. Kuvat 2 ja 3). Tiheämmillä kohteilla (runkoluku ≥ 1000 runkoa / ha) asemapisteen sijoitettiin 5 m välein ja harvemmillä kohteilla (runkoluku < 1000 runkoa / ha) 10 m välein. Jokaiselta skannausasemalta otettiin pystysuuntainen keilaus, ja joka toiselta vaakasuuntainen keilaus, jossa keilainta kallistettiin 90° . Vaakasuuntaisilla keilauksilla pyrittiin varmistamaan, että myös puiden latvuksista saadaan riittävästi mittaushavaintoja (keilaimen vertikaalinen maksimikulma 100°). Kaksi puukartoista oli käsitelty perinteisen mittauksen ja maalaserkeilauksen välissä, jotka hylättiin lopullisesta aineistosta. Lopullinen testiaineisto koostui 48 puukartasta.



Kuva 1. Riegl VZ-400i-maalaserkeilain.



Kuva 2. Skannausasemat asetettiin 5 m välein kohteille, joiden runkoluku ≥ 1000 kpl / ha. Punaisella kohteen keskipiste (keskimmäinen asemapiste) ja violetilla muut asemapistet. Kuvan tautalla käytetty kasvillisuuden pintamalli on luotu Maanmittauslaitoksen 5 p laserkeilausaineiston pohjalta, joka on vuodelta 2023.



Kuva 3. Skannausasemat asetettiin 10 m välein kohteille, joiden runkoluku < 1000 kpl / ha. Punaisella kohteen keskipiste (keskimmäinen asemapiste) ja oranssilla muut asemapistet. Kuvan tautalla käytetty kasvillisuuden pintamalli on luotu Maanmittauslaitoksen 5 p laserkeilausaineiston pohjalta, joka on vuodelta 2023.

3 Menetelmät

3.1 Pistepilven prosessointi ja puutason mallinnus

Pistepilvi esikäsiteltiin poistamalla aineistosta ylimääräiset virhepisteet (kohina) ja yhdistämällä erilliset skannaukset yhdeksi yhtenäiseksi pistepilveksi. Yhdistetty pistepilvi rajattiin koealaa vastaavaksi ja sitä harvennettiin tasaisesti, jotta sen tiheys olisi koko alueella samanlainen. Pistepilvien yhdistäminen ja prosessointi toteutettiin pääosin RiSCAN PRO -ohjelmistolla.

Puoliautomaattinen puutason mallinnus aloitettiin RiSCAN PRO -ohjelmiston mukana tulevalla TreeAnalyzer-lisäosalla. Puutason pistepilvien (segmenttien) muodostus aloitettiin leikkaamalla pistepilvet rinnankorkeudelta. Leikatusta aineistosta algoritmi pyrki etsimään runkoja, joita käytettiin siemenpisteinä varsinaisten segmenttien muodostuksessa. Lopputuloksena saatiin puukohtaiset pistepilvet, alustavat puutason mittaukset ja jokaiselle puun pisteelle tieto miltä asemapisteeeltä se on keilattu. Segmentoinnin tulos tarkistettiin manuaalisesti, eli puuttuvat rungot etsittiin manuaalisesti, ylimääräiset puuhavainnot poistettiin ja segmentointia korjattiin tarvittaessa RiSCAN PRO -ohjelmistossa.

3.2 Puu- ja metsikkötason tunnusten laskenta

Puutason tunnukset johdettiin puukohtaisista pistepilvistä Point-Cloud-Tools-työkalun avulla ([Yrttimaa 2020](#); [Yrttimaa 2021](#); MATLAB). Ensimmäisenä puiden runkopisteet erotettiin latvuspisteistä. Puiden pituudet määritettiin rungon maanpinnan yläpuolisen korkeimman pisteen perusteella. Rinnankorkeusläpimitat määritettiin puolestaan runkokäyrää apuna käyttäen.

Maalaserkeilauksesta tunnistetut puut yhdistettiin maastossa perinteisesti mitattuihin puihin. Tulkittu puu katsottiin tunnistamattomaksi, jos sen läpimitta erosi > 10 cm ja pituus > 10 m perinteisesti mitatusta puusta. Huomioitavaa on, että tässä selvityksessä tarkasteltiin vain sitä, löydettiinkö kaikki perinteisesti mitatut puut maalaserkeilausaineistosta. Mahdollisia ylimääräisiä puuhavaintoja maalaseraineistosta ei tässä selvityksessä huomioitu.

Lopuksi maalaserpuista laskettiin metsikkötason runkoluku (runkoa / ha), pohjapinta-ala (m^2 / ha), pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (cm) ja pohjapinta-alla painotettu keskipituus (m) koealakohtaisesti. Puu- ja kuviotason tarkkuuksia arvioitiin ”ennustettu–havaittu”-kuvaajien, sekä RMSE (Root Mean Squared Error, keskineliövirheen neliöjuuri) ja harha arvojen avulla (pistepilvestä saadut arvot vähennetään perinteisesti maastossa mitatuista arvoista; positiivinen harha = systemaattinen yliarvio, ja päinvastoin).

3.3 Keilausverkon optimointi ja automaattinen tulkintatestaus

Keilausverkon optimoinnissa etsittiin koealakohteisesti pienin asemapisteidien joukko, joka takaa mitattavan kohteen puiden tunnistamisen. Toisin sanoen, optimoinnissa tavoitteena oli löytää vähimmäismäärä skannauksia, joiden muodostama pistepilviaineisto kattoi mitattavat puut luotettavasti. Asemapisteidien optimoinnissa tarkasteltiin mm. mitattavan kohteen näkyvyyttä, runkohavaintojen kattavuutta ja skannausetäisyyttä. Keilausverkon optimointia jatkettiin, kunnes 99 % puista oli tunnistettu ja niiden rinnankorkeusläpimitta oli mahdollista mitata alle 30 % virheellä. Muutoin optimointia jatkettiin lisäämällä asemapisteitä, kunnes edellä mainitut ehdot täyttyivät.

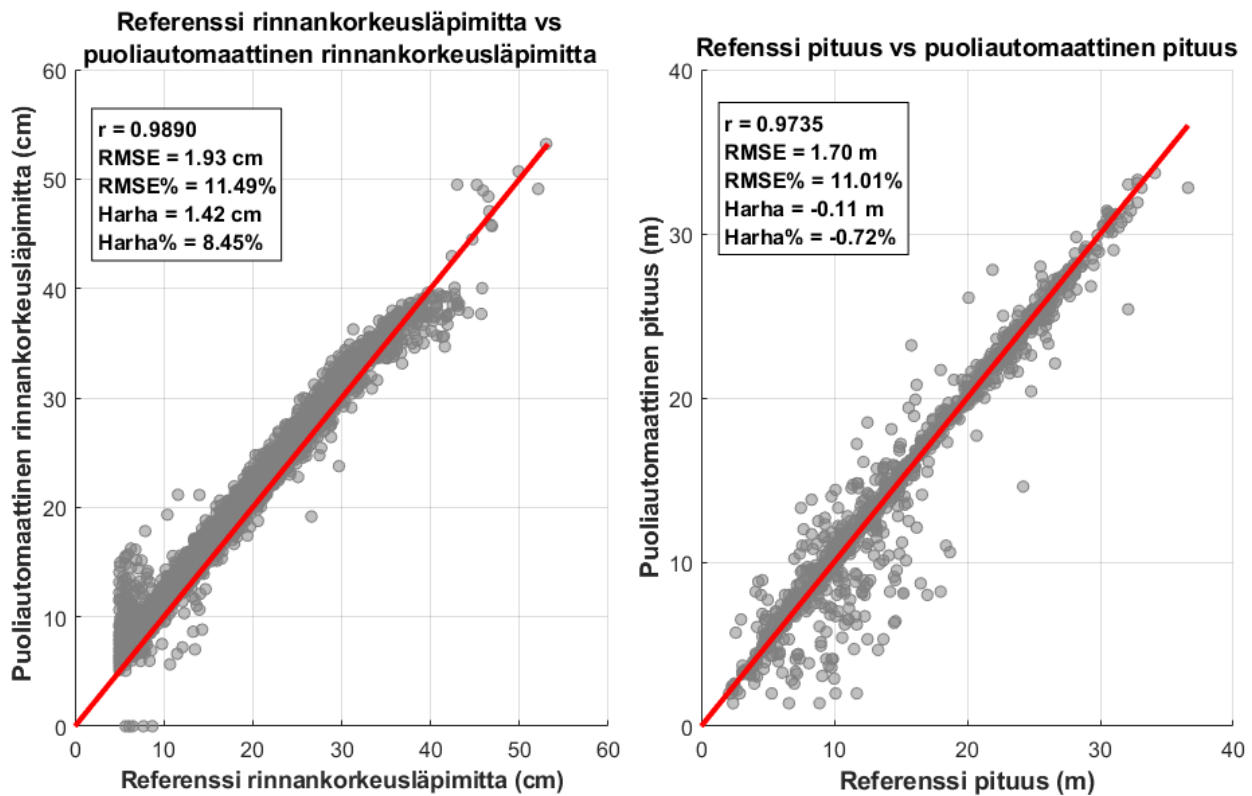
Kun jokaiselle koealalle oli määritetty pienin mahdollinen asemapisteidien määrä, aineistoa vasten ajettiin täysin automaattinen puiden tunnistus ja mittaus CloudComparen 3DFin-laajennusta käyttäen. Automaattisesti tunnistetut puut linkitettiin perinteisesti maastossa mitattuun tietoon ja puu- ja metsikkötason tarkkuuksia arvioitiin samalla periaatteella kuin kappaleessa 3.2.

4 Tulokset

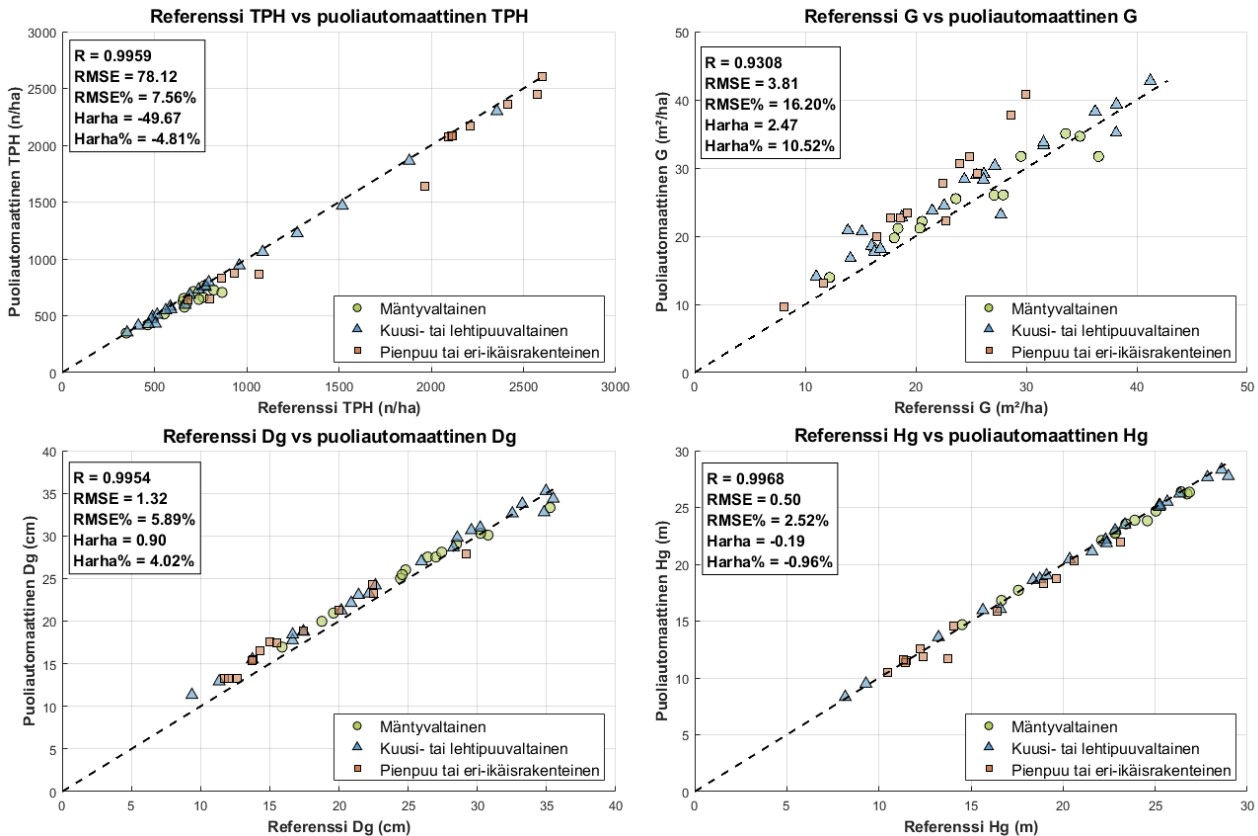
Puoliautomaattisen tulkinnan tulokset on esitetty Kuvissa 4 ja 5, ja Liitteessä 1. Puutasolla Riegl VZ-400i keilaimella päästiin läpimitan osalta 1,9 m (RMSE) ja pituuden osalta 1,7 m (RMSE) tarkkuuteen. Alle 10 cm puille oli havaittavissa selkeää läpimittamittausten yliarviointia, ja alle 15 cm puille pituusmittausten osittaista aliarviointia. Koko aineistossa puista saatiin tunnistettua 95 %. Heikoin tunnistustarkkuus oli läpimittaluokassa 5–7 cm, jossa tunnistustarkkuus oli 80 %. Puiden tunnistustarkkuus oli sitä parempi, mitä paksummista puista oli kysymys. Metsikkötasolla maala-sertulkittu runkoluku, pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ja pohjapinta-alalla painotettu keskipituus vastasivat hyvin perinteisesti mitattuja tietoja; RMSE:t 78.1 runkoa/ha, 1,3 cm ja 0,5 m; harhat -49,7 runkoa/ha, 0,9 cm ja -0,2 m. Maala-sertulkittu pohjapinta-ala erosi tarkasteltavista tunnuksista eniten perinteisesti mitattusta; RMSE 3.8 m² ja harha 2,5 m². Erityisesti pienpuukohteilla pohjapinta-alassa oli havaittavissa selkeää yliarviota.

Asemapisteidien määrän optimointi toimi 88 % koealoista. Optimoiduilla koealoilla riitti keskimäärin 33 % alkuperäisistä asemapisteidistä. Täysin automaattisen puustotulkinnan rinnankorkeusläpimitan ja pituuden virheet olivat puoliautomaattista tulkintaa suurempia; rinnankorkeusläpimitan RMSE 3,0 cm ja pituuden RMSE 2,8 m. Metsikkötason tunnusten tarkkuus heikkeni erityisesti runkoluvun osalta; RMSE 524,2 runkoa / ha ja harha -313,2 runkoa / ha. Myös pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ja -pituus heikkenivät hieman; RMSE:t 2,6 cm ja 1,0 m; harhat; 2,2

cm ha 0,5 m. Pohjapinta-ala kuitenkin parani hieman perinteiseen mittaukseen verrattuna; RMSE 3,6 m²/ha ja harha 0,04 m²/ha. Puiden tunnistustarkkuus automaattitulkinnessa väheni 20 prosenttiyksikköä.



Kuva 4. Puutason tarkkuudet puoliautomaattisella tulkinalla.



Kuva 5. Metsikkötason tarkkuudet puoliautomaattisella tulkinnalla. TPH = runko-luku (runkoa / ha), G = pohjapinta-ala (m²/ha), Dg = pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta (cm), Hg = pohjapinta-alalla painotettu keskipituus (m).

5 Johtopäätökset

Työn tulokset osoittavat, että maalaserekkeiläusaineistoista voidaan johtaa melko tarkkoja puu- ja metsikkötason tunnuksia erityisesti, jos aineisto hankitaan tiheällä asemapisteverkolla ja tulkintaan sisällytetään manuaalisia työvaiheita. Puoliautomaattisella menetelmällä voidaan havaita jopa 95 % kaikista puista. Ainoastaan haasteita syntyy tiheillä pienpuukohteilla, joilla matalammasta puiden tunnistus-tarkkuudesta huolimatta (80 %) pohjapinta-alalle saadaan systemaattisia yliarvioita. Maastolaserkeiläusaineistosta pienten puiden läpimitat tulevat usein helposti yliarvioitua. Huomioitavaa kuitenkin on, että maalaserekkeiläuksen ja perinteisen mittauksen välillä oli kulunut aikaa (2024 vs. 2023), jonka takia osa nuorten kehitysvaiheen metsien pohjapinta-alan yliarvioista on selittävässä myös puuston kasvulla olettaen, että kohteilta jääneet tunnistamattomat puut olivat keskimääräistä pienempiä.

Optimoinnilla voidaan pienentää maalaserekkeiläukseen tarvittavien asemapisteverkoston tiheyttä merkittävästi. Tulevaisuudessa asemapistesteiden sijainteja voisi mahdollisesti pystyä ennustamaan maastosta saatavan ennakkotiedon, kuten esimerkiksi tiheän lentolaserkeiläusaineiston perusteella. Automaattinen tulkinta toimi

hyvin harvoissa, puustoltaan homogeenisissä metsissä, mutta tiheissä pienpuumetsiköissä runkoluku jäi pääsääntöisesti aliarvioksi. Pohjapinta-alan tarkentuminen automaattisessa tulkinnessa johtuu todennäköisesti siitä, että tiheillä pienpuukohdeilla on jäänyt reilusti puita tunnistamatta, joka kompensoi läpimittaennusteen yliarviota pohjapinta-alan laskennassa.

Maalaserkeilauksen operatiivinen käyttöönotto metsänmittauksessa vaatii vielä erityisesti automatisoitujen laskentarutiinien ja tiedontuotantoprosessien kehittämistä ja ohjelmistokehitystä manuaalityön minimoimiseksi.

Tekoälyn käyttö yhteenvedon tekemisessä

Yhteenvedon tekemisessä on hyödynnetty apuna OpenAI:n tekoälymallia (GPT-5). Yhteenvedo on editoitu ja jatkokirjoitettu Metsäkeskuksen erityisasiantuntijan toimesta, ja sen on tarkastanut työn alkuperäinen kirjoittaja.

Liite 1.

Taulukko 1. Maalaserkeilauksesta johdettujen puutason tunnusten absoluuttiset ja suhteelliset RMSE- ja harha-arvot puoliautomaattisella menetelmällä.

Tunnus ja yksikkö	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%
Rinnankorkeusläpimitta, cm	1,9	11,5	1,4	8,5
Pituus, m	1,7	11,0	-0,1	-0,7

Taulukko 2. Maalaserkeilauksesta johdettujen puutason tunnusten absoluuttiset ja suhteelliset RMSE- ja harha-arvot automaattisella menetelmällä.

Tunnus ja yksikkö	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%
Rinnankorkeusläpimitta, cm	3,0	16,1	1,5	8,0
Pituus, m	2,8	15,4	1,0	5,5

Taulukko 3. Maalaserkeilauksesta johdettujen metsikkötason tunnusten absoluuttiset ja suhteelliset RMSE- ja harha-arvot puoliautomaattisella menetelmällä.

Tunnus ja yksikkö	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%
Runkoluku, runkoa/ha	78,1	7,6	-49,7	-4,8
Pohjapinta-ala, m ² /ha	3,8	16,2	2,5	10,5
Pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, cm	1,3	5,9	0,9	4,0
Pohjapinta-alalla painotettu keskipituus, m	0,5	2,5	-0,2	-1,0

Taulukko 4. Maalaserkeilauksesta johdettujen metsikkötason tunnusten absoluuttiset ja suhteelliset RMSE- ja harha-arvot automaattisella menetelmällä.

Tunnus ja yksikkö	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%
Runkoluku, runkoa/ha	524,2	50,1	-313,2	-29,9
Pohjapinta-ala, m ² /ha	3,62	15,4	0,0	0,2
Pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta, cm	2,6	11,6	2,2	9,9
Pohjapinta-alalla painotettu keskipituus, m	1,0	5,2	0,5	2,5