



Maastolaserkeilausmenetelmän pilotointi tarkastustoiminnan tiedonkeruuseen

Kestävän täsmämetsätalouden todentaminen ja
menetelmät (KESTOTÄSMÄ) -hankkeen tulospöytä

Yhteistyössä Kestävästi tuotetun pienpuun saatavuuden
parantaminen Pohjois-Karjalassa (KESSU) -hankkeen kanssa.





MAASTOLASERKEILAUSMENETELMÄN PILOTOINTI TARKASTUSTOIMINNAN TIEDONKERUUSEEN

Raportin tekijä: Tuomas Korva

Kannen kuva: Eetu Kotivuori

Tämä pilotointi on toteutettu osana Suomen metsäkeskuksen Kestävän täsmämet-
sätalouden todentaminen ja menetelmät (KESTOTÄSMÄ) -hanketta. Pilotoinnissa
käytetyt maastolaseraineistot on kerätty Kestävästi tuotetun pienpuun saatavuuden
parantaminen Pohjois-Karjalassa (KESSU) -hankkeessa. Kessu-hankkeen toteutta-
jina toimivat Suomen metsäkeskus ja Luonnonvarakeskus. Maastolaserkeilausai-
neiston keruu ja aineistojen perusprosessointi toteutettiin yhteistyössä Suomen
metsäkeskuksen ja Itä-Suomen yliopiston kanssa, KESSU:n ja UNITE-lippulaivan ra-
hoituksella. Maalaseraineiston puustotulkinnan on tuottanut pilotointiin Forest De-
sign KESSU-hankkeen kautta. Vaihtoehtoinen puustotulkinta toteutettiin myös KES-
TOTÄSMÄ-hankkeen toimesta Terrasolidin Terra-ohjelmistolla. Tuloksien vertailu ja
maastoreferenssien kerääminen on toteutettu KESTOTÄSMÄ- hankkeella.



Sisällys

1 Pilotoinnin tavoite	4
2 Aineistot	4
2.1 Testialue ja perinteisen metsänmittausaineiston keruu.....	4
2.2 Maastolaserkeilaus	5
3 Menetelmät	6
3.1 Puustotulkinta	6
3.2 Tilastollinen tarkastelu	7
4 Tulokset	7
4.1 Puutason mittaustarkkuudet – Runkoluku	7
4.2 Puutason mittaustarkkuudet – Puulajitunnistus	9
4.3 Puutason mittaustarkkuudet – Puiden pituudet	11
4.4 Puutason mittaustarkkuudet – Puiden läpimitat	16
4.5 Puiden läpimitat eri puulajeilla	21
5 Johtopäätökset.....	25

1 Pilotoinnin tavoite

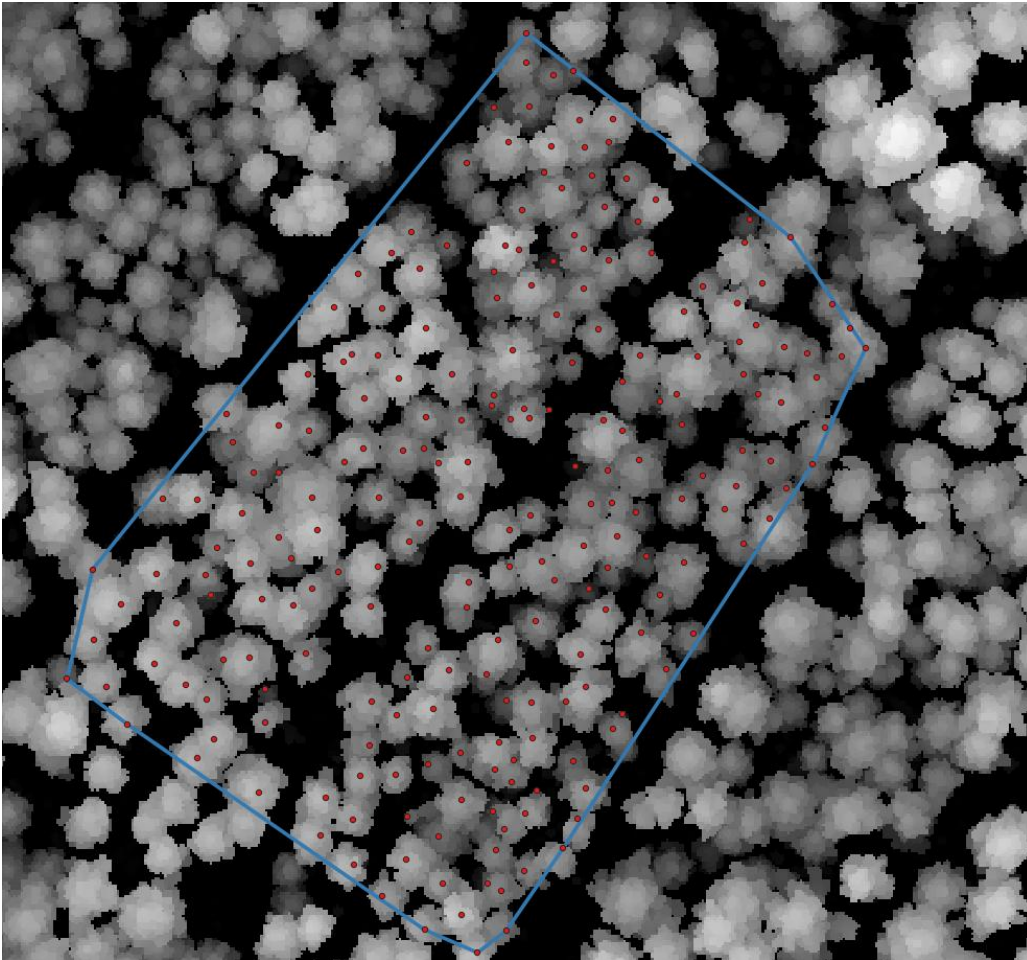
Pilotoinnin tavoitteena oli selvittää maastolaserkeilauksen soveltuvuutta metsälain, sekä rahoituslain (METKA) mukaiseen tarkastustoiminnan tiedonkeruuseen, jota Suomen metsäkeskus toteuttaa lakisääteisenä tehtävänä. Pilotoinnissa tarkasteltiin puustoisia kohteita, joissa puuston mitta- ja laatutietoa tarvitaan lakien vaatimusten täyttymisen arvioimiseksi.

2 Aineistot

2.1 Testialue ja perinteisen metsänmittausaineiston keruu

Pilotoinnin testialue sijaitsi Heinävedellä. Alueelta tunnistettiin metsikkökuvioita, joihin oli toteutettu koneellinen ensiharvennus muutaman vuoden sisällä. Kohteiden valintaehtona oli myös, että niille oli haettu ja maksettu Kestävän metsätalouden määräraikaisen rahoituslain (KEMERA) mukaista nuoren metsä hoidon tukea.

Perinteinen mittausaineisto kerättiin valituilta metsikkökuvioilta niin kutsuttuina puukarttoina syksyllä 2024. Puukartoilta mitattiin kaikkien yli 5 cm läpimittaisten puiden läpimitat ja pituudet, sekä määritettiin puiden sijainnit puulajit ja puuluokat (elävä/kuollut). Puukartoilla puiden sijainnit saadaan paikannettua paikantavien mittasaksien ja maastoon erikseen kiinnitettävien tukiasemien avulla. Koealoilta paikannetaan myös erikseen tarkasti koealan nurkkapisteet, joiden perusteella puukarttamittaus-tieto voidaan sitoa todelliseen koordinaatistoon (ETRS-TM35FIN). Mittattavia puukarttoja oli yhteensä 5 kpl ja niiden pinta-alat vaihtelivat 2264–3099 m² välillä. Puukartat kattoivat täten vain osan metsikkökuvioista, joiden pinta-alat vaihtelivat 10 800–28 000 m² välillä.



Kuva 1. Sinisellä esimerkkikoealan rajat, punaisilla pisteillä maastossa perinteisesti mitatut referenssipuut ja taustalla lento-laserkeilausaineistosta (Maanmittauslaitoksen 20 p laserkeilausaineisto vuodelta 2023) johdettu latvuston pintamalli (CHM).

2.2 Maastolaserkeilaus

Pilotoinnissa käytettiin Faro Orbis -mobiililaserkeilainta. Tiedonkeruu toteutettiin a) koko metsikkökuviolle ajouraverkoston mukaisesti kävellen, sekä b) ristikon muotoisesti pohjois-etelä- ja itä-länsisuuntaisia linjoja pitkin. Linjoittainen kävelyrata kattoi vain osan metsikkökuvioista ja linjojen välinä käytettiin 10 metriä. Keskimääräistä ajouraväliä ei mitattu testikohteilta, mutta tyypillisesti ensiharvennuksien ajouraväli on noin 19–20 metriä.

Faro Orbis -mobiililaserkeilain kiinnitettiin selkäreppuun tiedonkeruuta varten. Keilain käyttää SLAM-tekniikkaa (Simultaneous Localization and Mapping) ja tallentaa pistepilven, jonka perusteella voidaan muodostaa metsikön 3D-malli. Faro Orbis -aineiston georeferointia varten kohteilta kerättiin myös erillisiä referenssipaikannuspisteitä keilauksen aikana. Referenssipisteiden paikannuksessa käytettiin Trimble DA2 GNSS -paikannusyksikköä ja Trimnetin tarjoamaa Virtual Reference Station (VRS) -palvelua.

3 Menetelmät

3.1 Puustotulkinta

Tämän raportin tulokset pohjautuvat Romanianlaisen Forest Desingin tekemään puutason puustotulkintaan Faro Orbis maastolaserkeilausaineistosta, sekä Metsäkeskuksen tekemään puustotulkintaan TerraScanin TerraSolid -ohjelmistolla. Forest Desingin puustotulkinta on tehty Forest Desingin omalla VirtSilv-ohjelmistolla. VirtSilv-ohjelmiston automaattinen tulkinta perustuu yksittäisten puiden segmentointiin 3D-aineistosta ja puutason tietojen johtamiseen segmentoiduista puista. TerraSolid prosessoinnissa segmentointi suoritetaan ketjutetuilla laskennoilla (makrot), joiden lopputuotteena syntyy kohteen puulistaus. TerraScanissa valmis puulista käydään läpi manuaalisesti, korjataan segmentointia tarvittaessa ja luokitellaan puut puulajiluokkiin. Lopuksi valmiille puujoukolle ratkaistaan läpimitat ja pituudet TerraScanin valmiin työkalun avulla. Läpimittalaskentoja voi myös korjata manuaalisesti tarvittaessa.

Puustotulkintoja verrattiin suoraan maastossa syksyllä 2024 kerättyyn referenssietietoon samoilta kohteilta. Pilotoinnissa ei tehty manuaalista läpimittalaskennan korjausta TerraScanilla tuotettuun puustotulkintaan. TerraScanilla puustotulkinta tehtiin vain ajourakävelyreitin tiedoista. Forest Designin puustotulkinta tehtiin molemmille kävelyreittiaineistoille (ajoura ja linjoittainen). Huomioitavaa on, että kaikista raportissa esitetyistä tuloksista on suodatettu pois maastohavainnot, joiden pituus oli koealan puuston aritmeettista keskipituutta pienempi.

Puulajitunnistus toteutettiin Forest Designin tulkinnoissa VirtSilv-ohjelmiston automattiprosessin avulla. TerraScan-tulkinnoissa puulajitunnistus tehtiin metsäammatilaisen toimesta silmämääräisesti pistepilviä tarkastelemalla. TerraScanin segmentoinnin jälkeen on manuaalisesti erotettu puita toisistaan, sillä läheisien puiden pistepilvet voivat segmentoinnissa jäädä yhteen.

Puiden pituustulkinnat on tuotettu molemmilla ohjelmistoilla automaattisen tulkinnan kautta. TerraScanin segmentointia korjattiin tarvittaessa, kun puulistoja käytiin läpi, mutta puutason tiedontulkintaa ei korjattu manuaalisesti. VirtSilv-ohjelmisto tulkitsee pituudet suoraan pistepilviestä.

3.2 Tilastollinen tarkastelu

Tilastollisessa tarkastelussa maastolaserkeilauspohjaisten mittaus- ja tulkintamenetelmien tarkkuuksia vertailtiin perinteisin menetelmin tuotettuun mittaustietoon yksittäisten puiden tasolla. Lisäksi metsikkötasolla tarkasteltiin myös runkoluvun tarkkuutta. Faro Orbis-aineistosta tehty puustotulkinta linkitettiin perinteisesti maastossa mitattuun tietoon manuaalisesti paikkatieto-ohjelmistossa. Linkityksessä yhdistettiin selvästi sijainniltaan lähekkäin olevat havainnot vastinpareiksi. Apuna vastinparien kohdistamisessa käytettiin maastomitattujen ja tulkittujen puiden pituutta ja puulajia.

Kaikkien mallien rinnankorkeusläpimittatulkinnot on tuotettu automaattisesti ilman jälkikorjauksia. Segmentoinnin jälkeen lähekkäin kasvavia puita on kuitenkin erotettu manuaalisesti TerraScan -tulkintaan. Joissakin tapauksissa TerraScan -ohjelma ei pystynyt laskemaan läpimittaa suoraan rinnankorkeudelta, jolloin mittaus tehtiin korkeammalta rungosta. Näihin yksittäisiin poikkeamiin ei tehty korjauksia, mikä on huomioitava tulosten tulkinnessa. Tuloksista on suodatettu pois puuston koealan aritmeettisen keskiarvon keskipituuden arvoa lyhyemmät maastohavainnot.

Tulosten tilastollista arviointia varten laskettiin RMSE (keskivirheen neliöjuuri) ja harha puiden pituuden ja läpimitan vertailussa. RMSE kuvaa mallin ennusteiden keskimääräistä poikkeamaa mitatuista arvoista ja antaa siten käsityksen virheiden kokonaismäärästä. Mitä pienempi RMSE-arvo on, sitä tarkemmin malli ennustaa havaintoja. Harha puolestaan kuvaa systemaattista virhettä eli sitä, onko mallilla taipumusta joko yli- tai aliarvioida todellisia arvoja. Positiivinen harha tarkoittaa, että malli yliarvioi keskimäärin mitattuja arvoja, kun taas negatiivinen harha osoittaa aliarviointia.

4 Tulokset

4.1 Puutason mittaustarkkuudet – Runkoluku

Taulukossa 1 on esitetty koealojen maastolaserkeilaustulkitut runkoluvut sekä kokonaismääränä (kpl) että hehtaariohtaisena (kpl/ha), eriteltynä kävelyreitit ja tulkintatavan mukaan. Taulukossa on esitetty myös vastaavat luvut perinteisesti maastossa mitatulle tiedolle. Tunnistamattomien puiden määrä on laskettu erotuksena, ja tunnistettujen puiden osuus on ilmoitettu prosentteina. Taulukossa esitetty Koeala ID määrittää koealan numeron, kävelyreitit ja tulkintatavan; T = TerraScan-tulkinta (ajourareitti), FD = VirtSilv -tulkinta (ajourareitti) ja FD-L = VirtSilv -tulkinta (linjareitti).

Taulukko 1. Koealojen runkoluvut maastolaserkeilausaineistosta tulkittuna, eriteltynä ke-
ruu- ja tulkintamenetelmittäin (T = TerraScan-tulkinta, ajourareitti; FD = VirtSilv -tulkinta,
ajourareitti; FD-L = VirtSilv -tulkinta, linjareitti) sekä vertailuna perinteisiin maastomittauk-
siin.

Koeala ID	Koealan pinta- ala(m ²)	Runkoluku (kpl)	Tunnistettu runko- luku (kpl)	Runkoluku (kpl/ha)	Tunnistettu runkoluku (kpl/ha)	Tunnistuspro- senti
106636-FD	2812	336	321	1195	1141	95,5 %
106636-FD-L	2812	335	313	1191	1113	93,4 %
106636-T	2812	336	308	1195	1095	91,7 %
23771-FD	2334	264	198	1131	848	75,0 %
23771-FD-L	1210	153	118	1264	975	77,1 %
23771-T	2334	264	219	1131	938	83,0 %
27003-FD	2264	148	140	654	618	94,6 %
27003-FD-L	2264	148	141	654	623	95,3 %
27003-T	2264	148	142	654	627	95,9 %
34561-FD	3099	302	281	975	907	93,0 %
34561-FD-L	2470	244	237	988	960	97,1 %
34561-T	3099	302	290	975	936	96,0 %
88865-FD	2498	217	195	869	781	89,9 %
88865-FD-L	2498	217	188	869	753	86,6 %
88865-T	2498	217	200	869	801	92,2 %
Keskiarvo	2484	242	219	974	874	90,4 %

Kuvioiden keskimääräinen tunnistustarkkuus oli keskimäärin yli 90 %, joka oli pilo-
toinnille asetettujen tavoitteiden mukainen. Vastaavaan tunnistustarkkuuteen on
päästy KESTOTÄSMÄ-hankkeen testeissä vähintään 10 metrin pituuksissa puus-
toissa dronekuvaus ja -keilaus tekniikkaa hyödyntäen. Koealalla 23771 tunnistus-
tarkkuus oli kuitenkin huomattavasti muita koealoja heikompi, joka johtunee ainakin
osittain puuston kerroksellisuudesta. Muut koealat olivat puuston pituuden osalta
homogeenisempiä.

4.2 Puutason mittaustarkkuudet – Puulajitunnistus

Taulukoissa (2, 4, ja 6) on kuvattu puulajitunnistuksen onnistumista kappaleina tulkinnessa maastomittauksiin verrattuna eri tulkinta ja kävelyreittien osalta. Kun puolestaan taulukoissa (3, 5 ja 7) kuvataan puulajitunnistuksen onnistuminen prosentteina.

4.2.1 Puulajitunnistus VirtSilv tulkinnessa

Tulosten perusteella VirtSilv -ohjelmiston puulajitunnistuksen onnistumisessa ei ollut merkittävää eroa kahden eri kävelyreittimuodon pistepilvien välillä. Linjoittaisilla koealoilla havaintomäärä jäi hieman pienemmäksi, koska kahdella koealoilta oli kerätty tietoa maastokoealoja (puukarttoja) suppeammalta alueelta. Lajeista mänty tunnistui parhaiten, kun taas kuusi ja lehtipuut luokittuivat jonkin verran virheellisesti männyksi.

Ajouratulkinnan mukaan 4 mäntyä luokittui kuusiksi ja 8 lehtipuiksi (n = 350), 71 kuusta männyksi ja 1 lehtipuiksi (n = 586), sekä 51 lehtipuuta männyksi ja 5 kuusiksi (n = 199). (Taulukko 2)

Linjoittaisen kävelyreittitulkinnan mukaan 3 mäntyä luokittui kuusiksi ja 14 lehtipuiksi (n = 275), 61 kuusta männyksi ja 2 lehtipuiksi (n = 541), sekä 49 lehtipuuta männyksi (n = 199). (Taulukko 4)

Taulukko 2. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (kpl), VirtSilv ajourakävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	338	4	8	350
2 Maasto: kuusi	71	514	1	586
3 Maasto: lehtipuu	51	5	143	199
Yhteensä	460	523	152	1135

Taulukko 3. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (%), VirtSilv ajourakävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	29,78 %	0,35 %	0,70 %	30,84 %
2 Maasto: kuusi	6,26 %	45,29 %	0,09 %	51,63 %
3 Maasto: lehtipuu	4,49 %	0,44 %	12,60 %	17,53 %
Yhteensä	40,53 %	46,08 %	13,39 %	100,00 %

Taulukko 4. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (kpl), VirtSilv linjoittainen kävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	258	3	14	275
2 Maasto: kuusi	61	478	2	541
3 Maasto: lehtipuu	49	-	132	181
Yhteensä	368	481	148	997

Taulukko 5. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (%), VirtSilv linjoittainen kävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	25,88 %	0,30 %	1,40 %	27,58 %
2 Maasto: kuusi	6,12 %	47,94 %	0,20 %	54,26 %
3 Maasto: lehtipuu	4,91 %	-	13,24 %	18,15 %
Yhteensä	36,91 %	48,24 %	14,84 %	100,00 %

4.2.2 Puulajitunnistus TerraScan tulkinassa

TerraScan -menetelmällä tehty silmämääräinen puulajitunnistus sisälsi myös luokitteluvirheitä. Virheiden jakauma oli seuraava: 11 mäntyä luokiteltiin kuusiksi ja 3 lehtipuiksi (n=344), 1 kuusi luokiteltiin männyksi ja 1 lehtipuiksi (n=324) ja 27 lehtipuuta luokiteltiin männyksi ja 2 kuusiksi (n=183). (Taulukko 6.) Kokonaisuudessaan silmämääräinen tunnistus onnistui vain hieman paremmin kuin VirtSilvin automaattinen tulkinta.

Taulukko 6. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (kpl), Terra Scan ajourakävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	330	11	3	344
2 Maasto: kuusi	1	322	1	324
3 Maasto: lehtipuu	27	2	154	183
Yhteensä	358	335	158	851

Taulukko 7. Tunnistettujen puiden puulaji suhteessa maastossa luokiteltuihin (%), Terra Scan linjoittainen kävelyreitti

	1 Tulkittu: mänty	2 Tulkittu: kuusi	3 Tulkittu: lehtipuu	Yhteensä
1 Maasto: mänty	38,78 %	1,29 %	0,35 %	40,42 %
2 Maasto: kuusi	0,12 %	37,84 %	0,12 %	38,07 %
3 Maasto: lehtipuu	3,17 %	0,24 %	18,10 %	21,50 %
Yhteensä	42,07 %	39,37 %	18,57 %	100,00 %

4.3 Puutason mittaustarkkuudet – Puiden pituudet

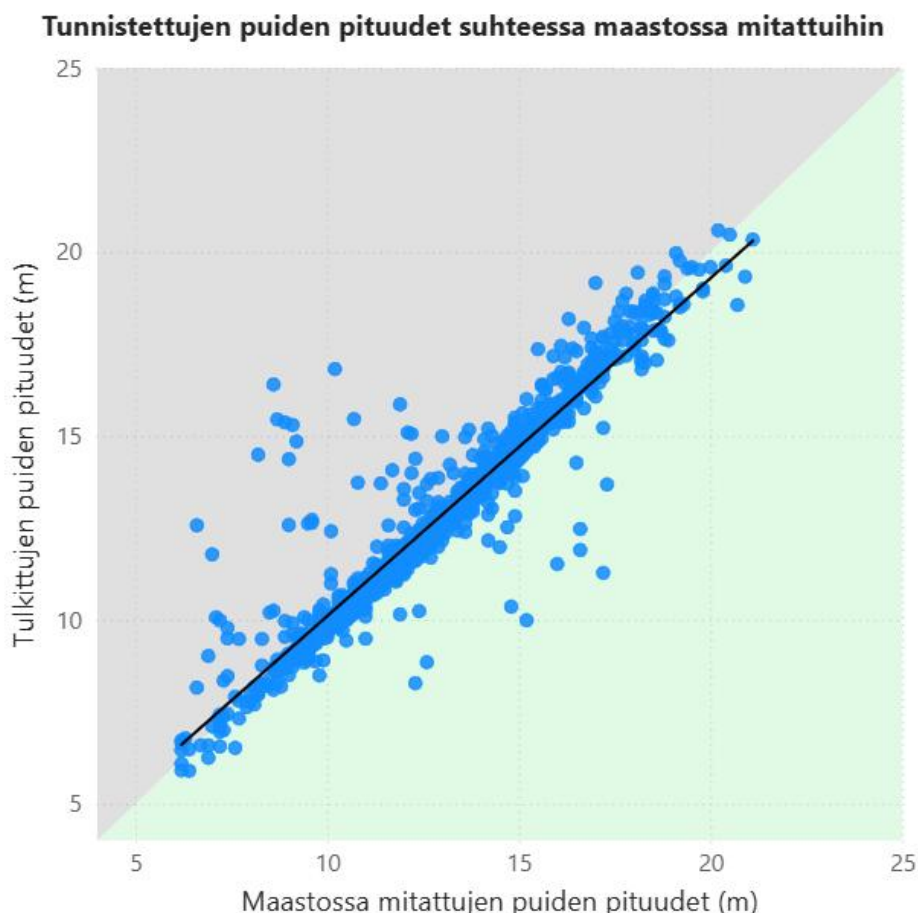
Taulukoissa 8, 10 ja 12 on esitetty perinteisesti mitattujen ja maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen puiden pituuksien minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot eri tulkinta- ja kävelyreittien osalta. Taulukoissa 9, 11 ja 13 on puolestaan esitetty maastolaserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan tarkkuutta kuvaavat RMSE- ja harha-arvot. Kuvissa 2, 3 ja 4 havainnollistetaan maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen pituuksien suhdetta perinteisiin maastomittauksiin eri tulkinta- ja kävelyreittien osalta.

4.3.1 Pituuden tunnistus VirtSilv -ajourakävelyreitillä aineistosta

Ajourakävelyreitillä tietojen tulkinassa pituusennustus oli onnistunut VirtSilvin mallilla hyvin. Mitattujen pituuksien vaihteluväli oli 6,20–21,10 m ja tulkittujen 5,90–

20,59 m. Keskimääräiset pituudet erosivat vain vähän (12,90 m vs. 12,76 m), ja mediaanit olivat lähes samat (12,90 m vs. 12,62 m). (Taulukko 8)

Menetelmän systemaattinen harha oli hyvin vähäinen (Harha = -0,14 m). Selkeää yli- tai aliarviointia esiintyy ainoastaan yksittäisillä puilla. Hajonnan mittarina käytetty keskivirheen neliöjuuri (RMSE) oli 0,95 m, mikä osoittaa pituustulkintojen olevan perinteisiin maastomittauksiin verrattuna melko tarkkoja. (Taulukko 9)



Kuva 2. VirtSilv -ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien välinen suhde.

Taulukko 8. VirtSilv -ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

	Perinteisesti mitatut pituudet (m)	Tulkitut pituudet (m)
Minimi	6,2	5,90
Maksimi	21,1	20,59
Keskiarvo	12,9	12,76
Mediaani	12,9	12,62

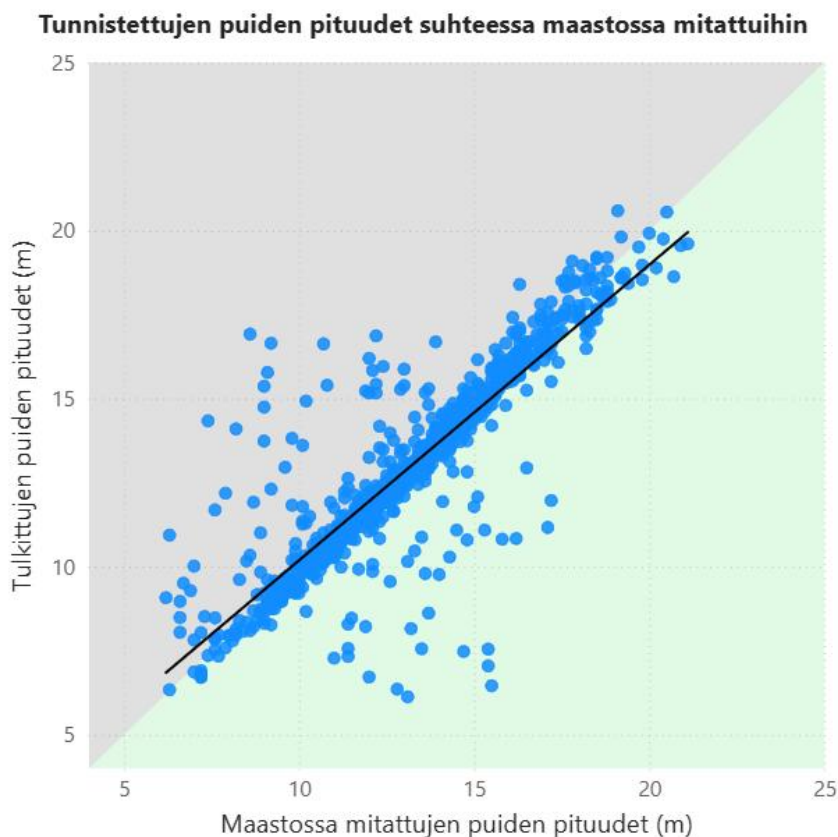
Taulukko 9. VirtSilv -ajourakävelyreitillä tunnistettujen puiden pituuden RMSE ja harha.

Tulkittujen pituuksien tarkkuudet	
	(m)
RMSE	0,95
Harha	-0,14

4.3.2 Pituuden tunnistus VirtSilv -linjoittaisesta kävelyreitistä aineistosta

Linjoittaiselta kävelyreitiltä kerätyn aineiston pohjalta Forest Desingin VirtSilv-ohjelmistolla tulkittujen ja maastossa perinteisesti mitattujen puiden pituudet vastasivat hyvin toisiaan. Mitattujen pituuksien vaihteluväli oli 6,20–21,10 m ja tulkittujen 6,13–20,59 m. Keskimääräiset pituudet erosivat vain vähän (13,12 m vs. 12,93 m), ja mediaanit olivat lähes samat (13,00 m vs. 12,81 m). (Taulukko 10.)

Menetelmän systemaattinen harha oli vähäinen (Harha = –0,19 m). Selkeää yli- tai aliarviointia esiintyy ainoastaan yksittäisillä puilla. Hajonnan mittarina käytetty keskivirheen neliöjuuri (RMSE) oli 1,35 m. Linjoittaisen menetelmän RMSE ja harha oli jonkin verran suurempi kuin ajourilta kerätyssä aineistossa, mikä todennäköisesti johtuu siitä, että ajourilta pistepilveen tallentuu enemmän latvushavaintoja. (Taulukko 11.)



Kuva 3. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien välinen suhde.

Taulukko 10. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

	Perinteisesti mitatut pituudet (m)	Tulkitut pituudet (m)
Minimi	6,20	6,13
Maksimi	21,10	20,59
Keskiarvo	13,12	12,93
Mediaani	13,00	12,81

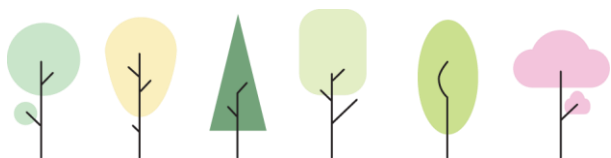
Taulukko 11. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen puiden pituuden RMSE ja harha.

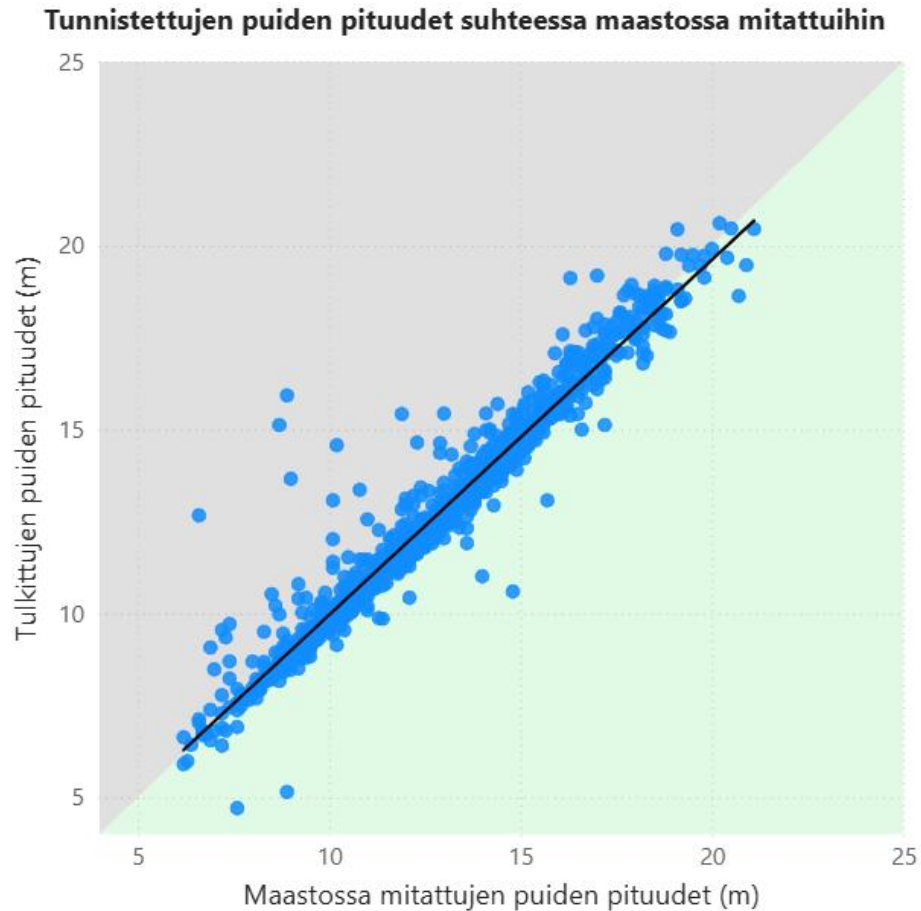
	Tulkittujen pituuksien tarkkuudet (m)
RMSE	1,35
Harha	-0,19

4.3.3 Pituuden tunnistus TerraScan -ajourakävelyreitien aineistosta

Ajourakävelyreitiltä kerättyjen aineistojen pohjalta TerraScan -ohjelmistolla toteutettujen puiden pituustulkintojen tarkkuus oli hyvä suhteessa maastossa perinteisesti mitattuihin tietoihin. Mitattujen pituuksien vaihteluväli oli 6,20–21,10 m ja tulkittujen 4,71–20,61 m. Keskimääräiset pituudet olivat ajouratulkinnessa ja perinteisessä mittauksella (12,82 m perinteisesti mitatuissa vs. 12,68 m tulkituissa), ja mediaanit erosivat näiden mittausmenetelmien välillä 0,32 m (12,80 m perinteisesti mitatuissa vs. 12,48 m tulkituissa). (Taulukko 12.)

Ajourakävelyreitti aineistoista tehtyjen pituustulkintojen systemaattinen harha oli hyvin pieni (Harha = –0,14 m), mikä osoittaa, ettei tulkinta aiheuta systemaattisia yli- tai aliarvioita. Myös tulkittujen pituuksien hajonta oli vähäistä, sillä keskivirheen neliöjuuri (RMSE) oli vain 0,69 m (Taulukko 13.)





Kuva 4. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien välinen suhde.

Taulukko 12. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden pituuksien minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

	Perinteisesti mitatut pituudet (m)	Tulkitut pituudet (m)
Minimi	6,20	4,71
Maksimi	21,10	20,61
Keskiarvo	12,82	12,68
Mediaani	12,80	12,48

Taulukko 13. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen puiden pituuden RMSE ja harha.

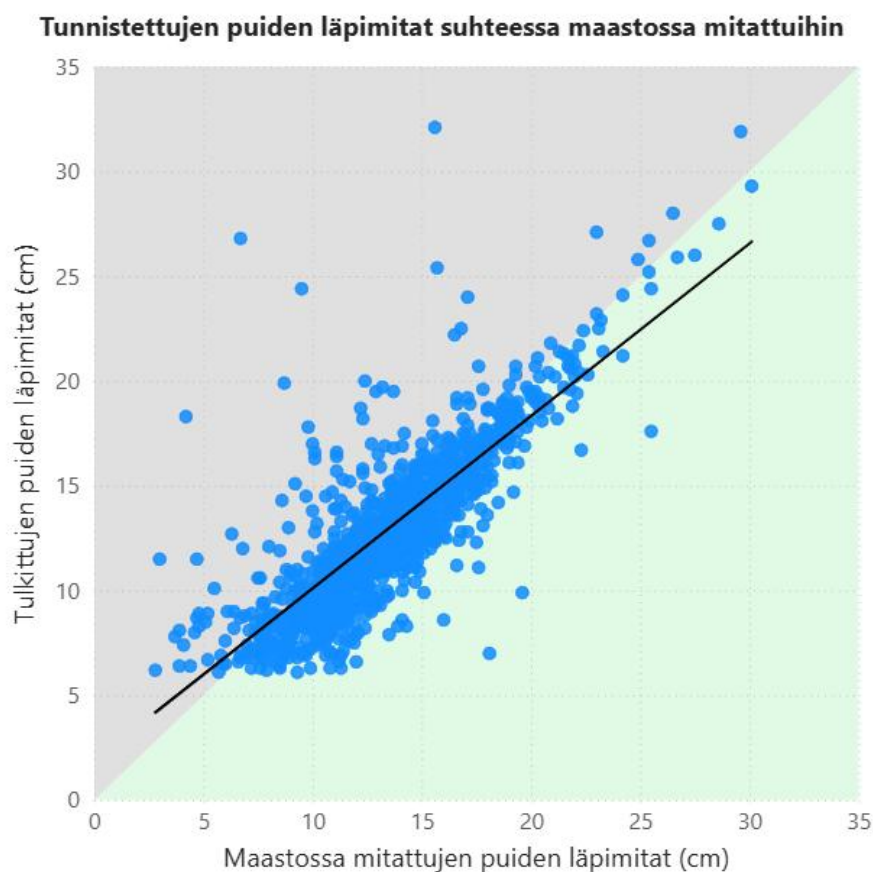
	Tulkittujen pituuksien tarkkuudet (m)
RMSE	0,69
Harha	-0,14

4.4 Puutason mittaustarkkuudet – Puiden läpimitat

Taulukoissa 14, 16 ja 18 esitetty perinteisesti mitattujen ja maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen puiden rinnankorkeusläpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot eri tulkinta- ja kävelyreittien osalta. Taulukoissa 15, 17 ja 19 on puolestaan esitetty maastolaserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan läpimitan tarkkuutta kuvaavat RMSE- ja harha-arvot. Kuvissa 5, 6 ja 7 havainnollistetaan maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen läpimittojen suhdetta perinteisiin maastomittauksiin eri tulkinta- ja kävelyreittien osalta.

4.4.1 Läpimitan tunnistus VirtSilv-ajourakävelyreitillä aineistosta

Ajourilta kerätyn maastolaserkeilausaineiston pohjalta tehtyjen VirtSilv-tulkintojen rinnankorkeusläpimittojen tulokset olivat yhteneviä perinteisesti maastossa mitattuun tietoon. Mitattujen läpimittojen keskiarvo oli 13,44 cm ja mediaani 13,3 cm, kun taas tulkituissa arvoissa vastaavat arvot olivat 12,9 cm ja 12,5 cm. Erot keskiarvojen ja mediaanien välillä olivat kohtuullisen pieniä, joka kertoo menetelmän luotettavuudesta yleisellä tasolla. Ääripäissä havaittiin kuitenkin eroja; perinteisesti mitatuissa läpimitoissa vaihteluväli oli 2,8–30,1 cm, kun taas tulkituissa 6,1–71,4 cm. Toisin sanoen osa yksittäisistä puista on tulkittu huomattavasti todellista suuremmiksi. Läpimitan RMSE koko aineistossa oli 3,19 cm ja harha -0,54 cm. (Taulukot 14 ja 15)



Kuva 5. VirtSilv -ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnan-
korkeusläpimitan välinen suhde.

Taulukko 14. VirtSilv-ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden
läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

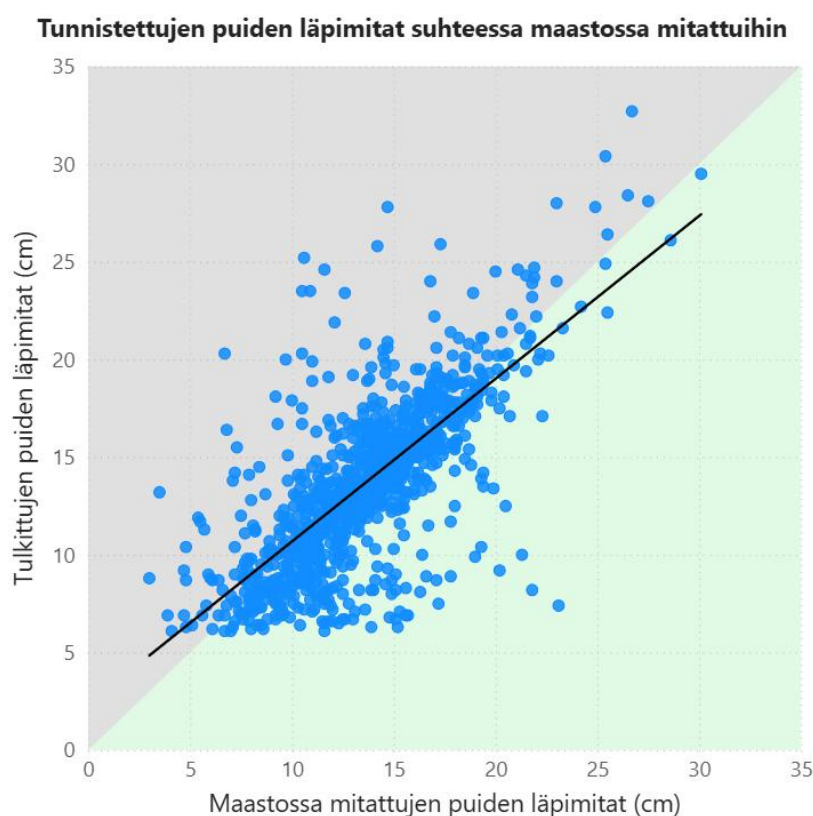
	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	2,80	6,10
Maksimi	30,10	71,40
Keskiarvo	13,44	12,90
Mediaani	13,30	12,50

Taulukko 15. VirtSilv-ajourakävelyreitillä tunnistettujen puiden läpimitan RMSE ja harha.

	Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)
RMSE	3,19
Harha	-0,54

4.4.2 Lämpimitan tunnistus VirtSilv-linjoittaisesta kävelyreitistä aineistosta

Linjoittaisen maastolaserkeilausaineiston pohjalta tehtyjen VirtSilv-tulkintojen rinnankorkeusläpimittojen tulokset olivat yhteneviä perinteisesti maastossa mitattuun tietoon. Mitatuissa arvoissa keskiarvo oli 13,55 cm ja mediaani 13,5 cm, kun taas tulkituissa keskiarvo oli 13,63 cm ja mediaani 13,4 cm. Erot keskiarvon ja mediaanin välillä jäivät hyvin pieniksi, mikä kertoo menetelmän luotettavuudesta yleisellä tasolla. Arvojen vaihteluvälit poikkesivat kuitenkin selvästi toisistaan; mitattujen läpimittatulos oli 3,0–30,1 cm, kun taas tulkittujen 6,1–81,7 cm. Toisin sanoen osa yksittäisistä puista on tulkittu huomattavasti todellista suuremmiksi. Lämpimitan RMSE koko aineistossa oli 3,64 cm ja harha -0,08 cm. (Taulukot 16 ja 17)



Kuva 6. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitan välinen suhde.

Taulukko 16. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	3,00	6,10
Maksimi	30,10	81,70
Keskiarvo	13,55	13,63
Mediaani	13,50	13,40

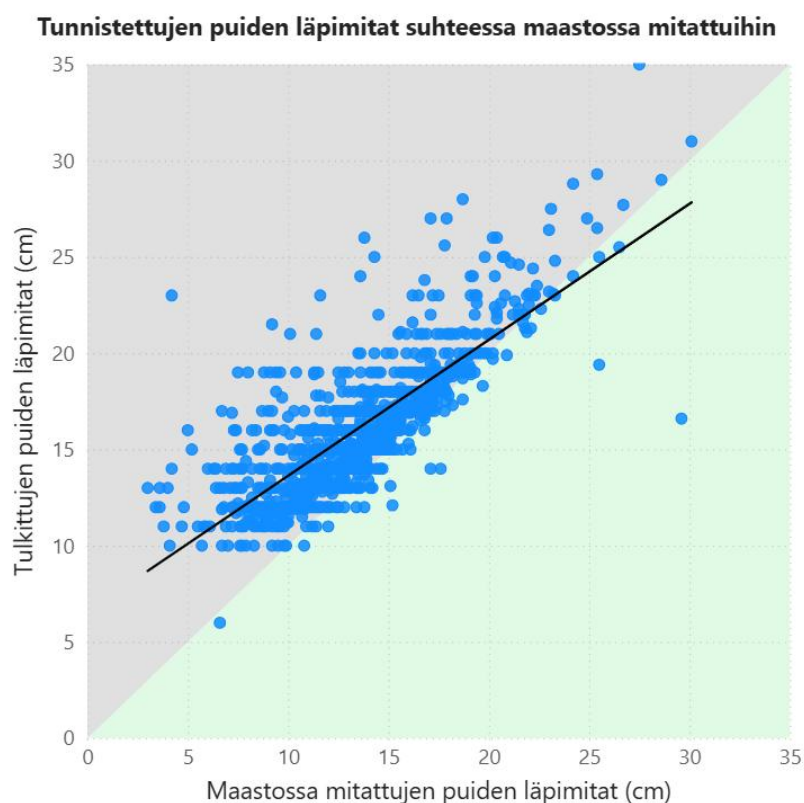
Taulukko 17. VirtSilv-linjoittaisella kävelyreitillä tunnistettujen puiden läpimitan RMSE ja harha.

Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)	
RMSE	3,64
Harha	0,08

4.4.3 Läpimitan tunnistus TerraScan-ajourakävelyreitillä aineistosta

Ajourakävelyreitiltä kerättyjen aineistojen pohjalta TerraScan-ohjelmistolla totutettujen puiden rinnankorkeusläpimittatulkintojen tulokset osoittavat selkeää systemaattista yliarviota perinteisesti maastossa mitattuun tietoon verrattuna. Perinteisesti mitattujen läpimittojen keskiarvo oli 13,39 cm ja mediaani 13,30 cm, kun taas tulkinnan kautta lasketut arvot olivat selvästi suurempia: keskiarvo 15,90 cm ja mediaani 15,70 cm. Tämä kertoo, että TerraScan-ohjelma tuotti systemaattisesti todellista suurempia läpimittatulkintoja. Myös vaihteluvälit tukevat tätä havaintoa; perinteisesti mitatut arvot vaihtelivat välillä 3,00–30,1 cm, mutta tulkitut välillä 6,00–35,00 cm. Havaintojen perusteella läpimitan yliarviot korostuivat erityisesti pienemmillä puilla. Läpimitan kasvaessa tulkitut läpimitat lähenivät perinteistä mittausta. Läpimitan RMSE oli 3,38 cm ja harha 2,48 cm TerraScan-tulkinnassa. (Taulukot 18 ja 19)

Läpimitat ovat osalla kohteilla kirjoitettu desimaalin tarkkuudella tulkinnassa ja osassa kahden desimaalin, johtuen järjestelmän versiopäivityksestä, joka tehtiin tulkintojen välillä. Tämä näkyy myös (Kuva 7.) tulkittujen puiden jakautuessa tasaisesti desimaalin kynnykseen.



Kuva 7. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitan välinen suhde.

Taulukko 18. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot.

	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	3,00	6,00
Maksimi	30,10	35,00
Keskiarvo	13,39	15,90
Mediaani	13,30	15,70

Taulukko 19. TerraScan-ajourakävelyreitillä tunnistettujen puiden läpimitan RMSE ja harha.

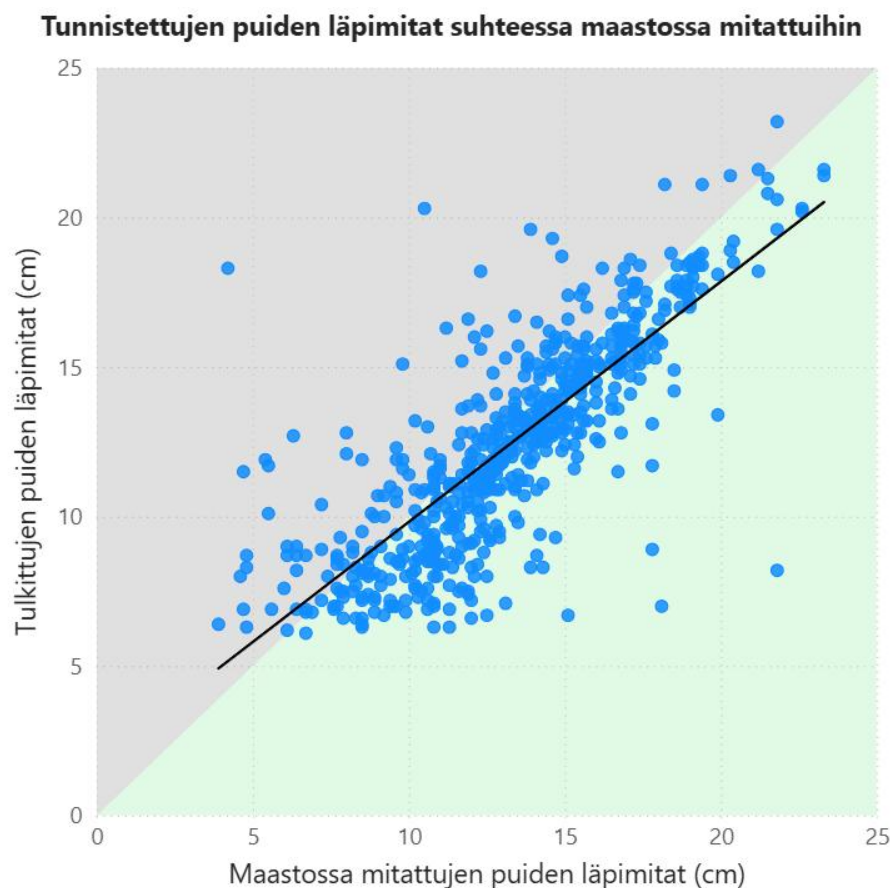
	Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)
RMSE	3,38
Harha	2,48

4.5 Puiden läpimitat eri puulajeilla

Tässä kappaleessa tarkastellaan edellisen kappaleen tuloksia puulajitasolla. Vertailuun on otettu vain VirtSilvin tulkinnot ajourilta sekä linjoittain, sillä näin nähdään eri puulajien vaikutus tulokseen selkeämmin. Taulukoissa 19, 21 ja 23 esitetty perinteisesti mitattujen ja maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen puiden rinnankorkeusläpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot eri puulajien osalta. Taulukoissa 20, 22 ja 24 on puolestaan esitetty maastolaserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan läpimitan tarkkuutta kuvaavat RMSE- ja harha-arvot puulajeittain. Kuvissa 8, 9 ja 10 havainnollistetaan maastolaserkeilausaineistosta tulkittujen läpimittojen suhdetta perinteisiin maastomittauksiin puulajeittain.

4.5.1 Läpimitan tunnistus männylle VirtSilv-aineistosta

Mäntyjen kohdalla perinteisesti mitattujen ja tulkittujen läpimittojen keskiarvot olivat 13,18 cm ja 12,36 cm, ja mediaanit vastaavasti 13,10 cm ja 12,30 cm. Keskimääräinen harha jäi negatiiviseksi (−0,82 cm), mikä tarkoittaa, että tulkinta aliarvioi läpimittaa hieman. RMSE oli 2,33 cm. Vaihteluväli oli perinteisesti mitatuissa 3,9–23,3 cm ja tulkituissa 6,1–23,2 cm, mikä osoittaa, että ääripäiden osalta menetelmä ei tuottanut suuria yli- tai aliarvioita. (Taulukot 20 ja 21)



Kuva 8. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitan välinen suhde männyllä.

Taulukko 20. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot männyllä.

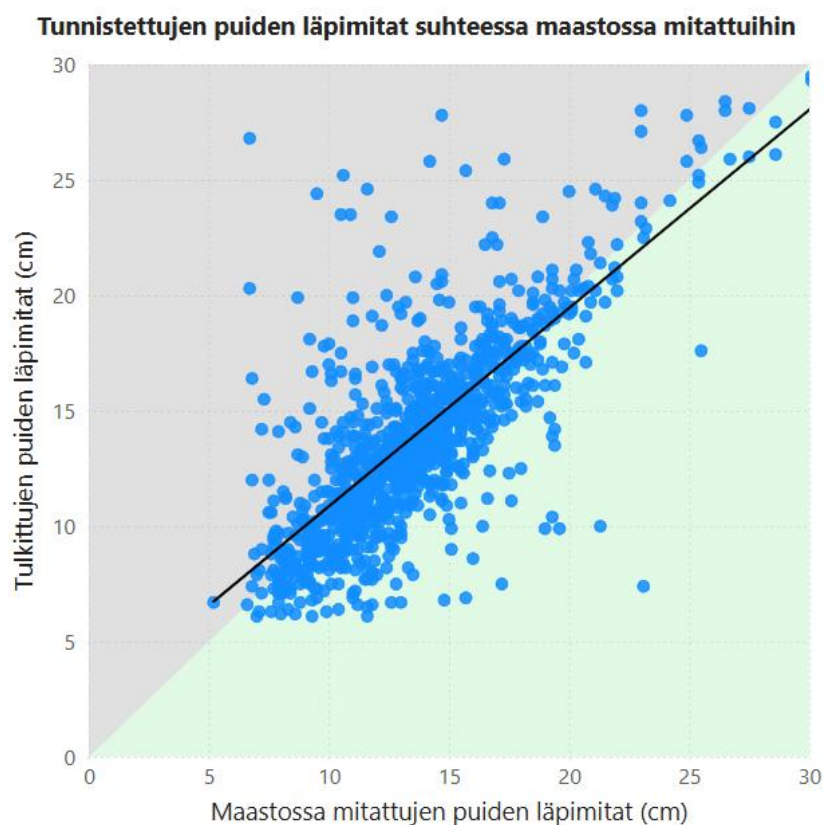
	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	3,90	6,10
Maksimi	23,30	23,20
Keskiarvo	13,18	12,36
Mediaani	13,10	12,30

Taulukko 21. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimitan RMSE ja harha männyllä.

	Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)
RMSE	2,33
Harha	-0,82

4.5.2 Läpimitan tunnistus kuuselle VirtSilv-aineistosta

Kuusilla perinteisesti mitattujen ja tulkittujen läpimittojen keskiarvot olivat 13,54 cm ja 13,84 cm, ja mediaanit molemmissa 13,30 cm. Harha jäi pieneksi ja positiiviseksi (+0,31 cm), mikä tarkoittaa lievää yliarviointia. RMSE oli 4,03 cm, eli hajonta oli suurempi kuin männyllä. Vaihteluvälit erosivat perinteisen mittauksen ja tulkitun tiedon välillä selvästi toisistaan; perinteisesti mitatuissa 5,20–30,10 cm ja tulkituissa 6,1–81,7 cm. Tämä kertoo, että yksittäisiä runkoja on tulkittu huomattavasti todellista suuremmiksi. (Taulukot 22 ja 23)



Kuva 9. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitan välinen suhde kuusella.

Taulukko 22. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot kuusella.

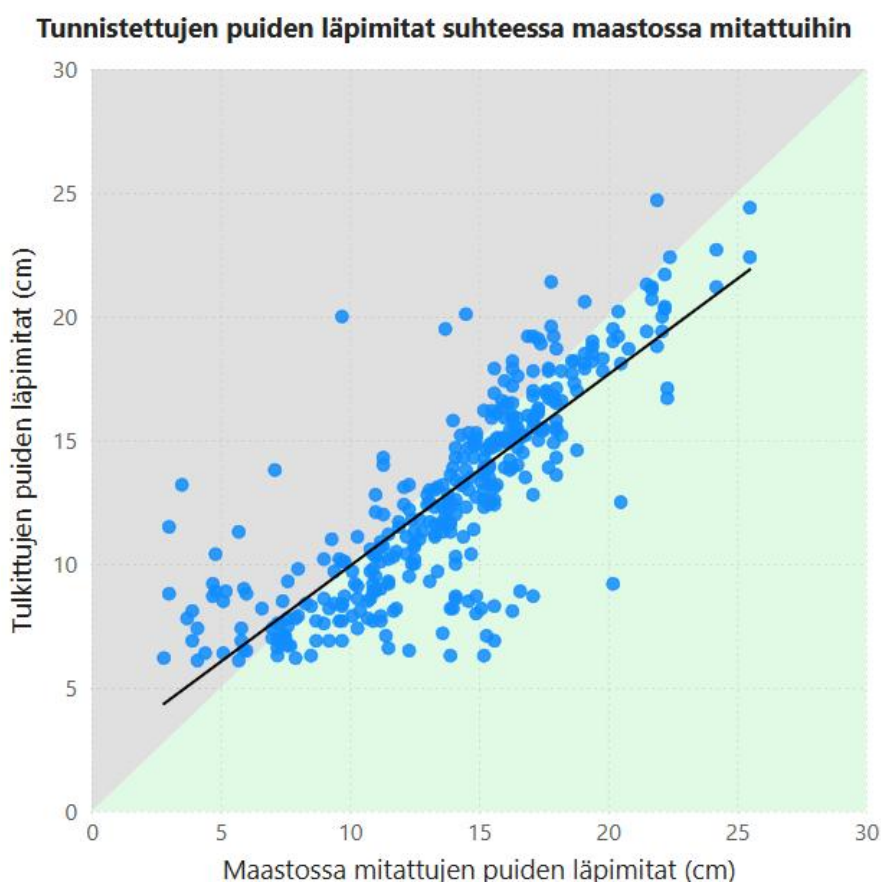
	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	5,20	6,10
Maksimi	30,10	81,70
Keskiarvo	13,54	13,84
Mediaani	13,30	13,30

Taulukko 23. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimitan RMSE ja harha kuusella.

	Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)
RMSE	4,03
Harha	0,31

4.5.3 Lämpimitan tunnistus lehtipuulle VirtSilv-aineistosta

Lehtipuilla mitattujen ja tulkittujen läpimittojen keskiarvot olivat 13,88 cm ja 12,93 cm, ja mediaanit 14,40 cm ja 12,80 cm. Tämä tarkoittaa, että menetelmä aliarvioi lehtipuiden läpimittoja systemaattisesti (harha -0,95 cm). RMSE oli 2,85 cm, eli keskimääräinen virhe pysyi lähellä männyn tasoa ja pienempänä kuin kuusella. Vaihteluvälit erosivat selvästi; perinteisesti mitatuissa 2,8–25,5 cm ja tulkituissa 6,1–32,1 cm. Tämä kertoo, että pienimpiä runkoja ei tulkittu oikein, ja yksittäisiä puita on arvioitu myös selvästi liian suuriksi. (Taulukot 24 ja 25)



Kuva 10. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden rinnankorkeusläpimitan välinen suhde lehtipuulla.

Taulukko 24. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimittojen minimi-, maksimi-, keskiarvo- ja mediaaniarvot lehtipuulla.

	Perinteisesti mitatut läpimitat (cm)	Tulkitut läpimitat (cm)
Minimi	2,80	6,10
Maksimi	25,50	32,10
Keskiarvo	13,88	12,93
Mediaani	14,40	12,80

Taulukko 25. VirtSilv-tunnistettujen ja maastossa mitattujen puiden läpimitan RMSE ja harha lehtipuulla.

Tulkittujen läpimittojen tarkkuudet (cm)	
RMSE	2,85
Harha	0,95

5 Johtopäätökset

Pilotointi oli tässä vaiheessa vielä selvästi kokeellinen koealamäärän ollessa suhteellisen pieni, mutta tulokset antavat rohkaisevia viitteitä menetelmän soveltuvuudesta Metsäkeskuksen tarkastustoimintaan. Erityisen myönteistä oli se, että puuston pituuden määrittäminen onnistui oletettua paremmin. Virheet ja hajonta jäivät puuston pituudessa keskimäärin hyvin pieniksi eri tunnuksissa ja aineistomuodoissa. Läpimitan osalta sen sijaan on vielä kehitettävää, sillä erityisesti kuusten kohdalla esiintyi hajontaa ja yksittäisiä merkittäviä virhetulkintoja. Virhelähteiden etsiminen ja selvittäminen tarjoaa kehityskohteita jatkotutkimuksille. Tämän pilotin kuusikoissa haasteita aiheutti erityisesti puuston oksaisuus. Se voi johtaa läpimitan yliarviointiin sekä heikentää pistepilven kattavuutta, kun oksat estävät laserkaaiun etenemistä.

Puulajitunnistuksen osalta automaattinen prosessointi VirtSilv-ohjelmistolla onnistui vähintään yhtä hyvin kuin TerraScanilla tehty enemmän manuaaliseen ”käsityöhön” perustuva tulkinta. Tämä kertoo siitä, että automaattinen prosessointi on jo nykyisellään kilpailukykyinen vaihtoehto, joka säästää aikaa ja vähentää inhimillisen virheen riskiä. Panoraamakuvien ja niistä laserpisteille johdettujen väriarvojen hyödyntäminen voisi todennäköisesti parantaa tuloksia puulajitunnistuksessa.

Pituusmittauksien osalta pilotin tuloksien perusteella voidaan todeta, että ajourilta kerätty aineisto tuottaa linjoittaista menetelmää hieman tarkempia pituustulkintoja. VirtSilv-malli antaa luotettavia tuloksia molemmissa aineistoissa, mutta ajourilta saavutetaan hieman parempi tarkkuus. TerraScan pituustulkinta ajourilta kerätyllä menetelmällä antaa parhaimman tuloksen. Segmentoinnin manuaalinen korjaaminen vähentää yksittäisiä virheitä, mutta keskitunnusten arviointiin sillä ei näytä olevan suurta vaikutusta, sillä hajontaa esiintyy molempiin suuntiin. Näin ollen pituustulkinnan tarkkuus perustuu ensisijaisesti pistepilviaineiston laatuun ja havaintojen kattavuuteen.

Puiden läpimitan tulkinnassa VirtSilvin tulokset olivat keskiarvoisesti hyviä, vaikka hajontaa oli jonkin verran. TerraSolidin tulkinta puolestaan yliarvioi läpimittoja erityisesti pienempien puiden kohdalla, mikä heikensi sen luotettavuutta, vaikka

kokonaisvirheet pysyivät kohtuullisina. Yleisesti ottaen automaattinen läpimitan laskenta toimii hyvin keskimääräisellä tasolla, vaikka yksittäisten runkojen kohdalla virheet voivat olla merkittäviä.

Tulokset osoittavat, että läpimitan laskennan tarkkuus vaihtelee puulajeittain. Mäntyjen tulkinnan hajonta oli tasaisin ja virheet pienimpiä, mikä näkyy alhaisimpana RMSE-arvona ja suhteellisen pienenä harhana. Kuusilla menetelmä tuotti hyvin osuvat keskiarvo- ja mediaaniluvut, mutta hajonta kasvoi huomattavasti ja yksittäiset virhetulkinnat nostivat tulkittujen arvojen ylärajaa selvästi. Lehtipuiden kohdalla havaittiin keskimääräistä aliarviointia, mutta hajonta pysyi maltillisena.

Kokonaisuutenaan puiden läpimitta saadaan maastolaseraineistosta laskettua parhaiten männyiltä, kohtalaisesti lehtipuilla ja heikoimmin kuusilla, joissa yksittäiset virhetulkinnat vääristävät jakaumaa eniten. Tämä vastaa yleisiä maastolaserkeilauksen rajoitteita, joissa puulajin rakenne (esim. kuusen tiheä oksaisuus tai lehtipuiden vaihteleva rungon muoto) vaikuttaa tulkinnan onnistumiseen.

Menetelmän käyttöönoton kannalta keskeistä on tiedonkeruun resurssitehokkuus. Maalaserkeilaus on nykyisellään hitaampaa ja kalliimpaa kuin esimerkiksi drone-pohjainen tiedonkeruu, mikä rajoittaa sen laajamittaista soveltamista. Toisaalta se tuottaa erittäin tarkkaa ja yksityiskohtaista aineistoa, mikä on arvokasta kohteissa, joissa tarvitaan yksittäisten runkojen mittauksia ja monimuotoisuuden arviointia. Verrattuna perinteiseen maastomittaukseen maalaserkeilaus on kuitenkin selvästi nopeampaa, jos mittaus perustuu yksinpuintulkintaan.

Yksittäisten koealojen väliset erot muistuttavat myös siitä, että näin pienessä pilotissa yksittäinen epäonnistunut koeala voi vääristää tilastollista kokonaiskuvaa. Tämä korostaa jatkoselvityksen tarvetta, jotta menetelmän luotettavuutta voidaan arvioida kattavammin erilaisissa metsiköissä. Lisäksi on huomioitava tiedonkeruun keli- ja sääolosuhteiden luomat rajoitteet, kuten sade ja korkea ilmankosteus, sekä kova tuuli. Tämän pilotin tiedonkeruu on tehty hyvissä olosuhteissa sateettomana aikana.

Pilotin tulokset osoittavat, että maastolaserkeilaus ja siihen perustuva puustotulkinta on kehittämiskelpoinen tiedonkeruumenetelmä. Sen vahvuudet korostuvat erityisesti puuston pituuden mittauksessa sekä automaattisen prosessoinnin luotettavuudessa. Automaattisen prosessoinnin osalta on hyvä kuitenkin tiedostaa, että kaupallisia toimijoita ja valmiita sovelluksia puulajitason yksinpuintulkintaan on vielä hyvin vähäisesti. Koska läpimitta ei nykyisin ole tarkastustoiminnan päätöksenteon kannalta keskeinen tunnus, voidaan pilotissa havaitut haasteet läpimitan tarkkuudessa asettaa toissijaiseen asemaan. Esimerkiksi metsätalouden kannustejärjestelmän (METKA) mukaisissa nuoren metsän hoidon työläjien rahoitusehdoissa puuston

keskipituudella on ylärajat, kun puolestaan edellisen rahoituslain (KEMERA) rahoitusehdoissa rinnankorkeusläpimitta oli ratkaiseva. Suurin haaste menetelmän käyttöönotossa tarkastustoiminnassa liittyykin tiedonkeruun kustannustehokkuuteen.