

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Metsätalouden koulutus

Lauri Korhonen
Kyösti Kuivalainen

FOTOGRAMMETRINEN METSÄNMITTAUSMENETELMÄ

Opinnäytetyö
Syyskuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Syyskuu 2019
Metsätalouden koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihe)

Tekijät
Korhonen Lauri, Kuivalainen Kyösti

Nimeke
Fotogrammetrinen metsänmittausmenetelmä

Toimeksiantaja
-

Tiivistelmä

Drone- ja sensoriteknologian kehittyminen on mahdollistanut erilaisten uusien kaukokartoitussovellutusten kehittämisen. Metsätaloudessa tätä voidaan hyödyntää metsäninventoinnissa. Tässä opinnäytetyössä testataan metsäsuunnitteluun kehitettyä fotogrammetrista metsäninventointimenetelmää.

Työ toteutettiin kuvaamalla syyskuussa 2018 koealoja, jotka Maanmittauslaitos oli aiemmin mitannut maastossa. Kuvauksista tuotettuja pituus- ja läpimittatietoja verrattiin Maanmittauslaitoksen aineistoon. Työn tavoite oli testata, tuottaako menetelmä uskottavia tuloksia. Tarkkuutta ei ollut mahdollista suoraan testata, koska Maanmittauslaitoksen mittaukset oli tehty neljä vuotta aiemmin.

Menetelmä osoittautui uskottavaksi. Joillakin koealoilla osa puustotunnuksista poikkesi liikaa tai väärään suuntaan odotetusta. Tutkimus myös alleviivasi jatkotutkimuksen tarvetta aiheesta.

Työllä ei ollut toimeksiantajaa, mutta se tehtiin yhteistyössä Metsälinkki Oy:n ja MosaicMill Oy:n kanssa.

Kieli
suomi

Sivuja 28
Liitteet 0
Liitesivumäärä 0

Asiasanat
metsäninventointi, RPAS, fotogrammetria, kaukokartoitus



THESIS
September 2019
Degree Programme in Forestry

Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
FINLAND
Tel. +358 13 260 600

Authors

Korhonen Lauri, Kuivalainen Kyösti

Title

Photogrammetric Forest Inventory

Commissioned by

-

Abstract

The advance of drone- and sensor technology has made it possible to develop new remote sensing applications. In forestry this can be utilized as a forest inventory method. In this thesis a photogrammetric forest inventory method, which is developed for forest management planning, is tested.

The study was carried out by aerial photography in September 2018. Test areas were measured earlier by the National Land Survey of Finland (NLS). The measurements produced from aerial images were compared to the data of NLS. The aim of the study was to find out if the results are reliable. The accuracy could not be directly tested, because the measurements of NLS were executed four years earlier.

The method appeared to be reliable. In some test areas some of the results differed too much or to the opposite direction as expected. The study also showed that more research of the topic is needed.

The work was not commissioned by anyone, but it was made in cooperation with Metsälinkki Oy and MosaicMill Oy.

Language
Finnish

Pages 28
Appendices 0
Pages of Appendices 0

Keywords

forest inventory, RPAS, photogrammetry, remote sensing

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Metsäninventointimenetelmät	5
2.1	Metsäninventointi perinteisin menetelmin	6
2.2	Metsäninventointi kaukokartoituksen keinoin	7
2.3	Tarkan mittaustiedon merkitys metsätaloudessa	8
3	Fotogrammetria mittausmenetelmänä	8
3.1	Fotogrammetria	8
3.2	Fotogrammetria UAV-kuvauksessa	9
3.2.1	Lentojen suunnittelu	9
3.2.2	Kuvien prosessointi	11
3.2.3	Korkeusmallin tarkkuus ja maan pintamallin käyttökelpoisuus	14
4	Opinnäytetyön tavoitteet	15
5	Aineisto ja menetelmät	16
5.1	Aineiston hankinta ja prosessointi	16
5.2	Aineiston suodatus ja mittaustulosten vertaaminen	17
6	Tulokset	19
6.1	Kaikki koealat	19
6.2	Tulokset koaloittain	22
6.2.1	Koeala 1002	22
6.2.2	Koeala 1009	23
6.2.3	Koeala 1014	23
6.2.4	Koeala 1060	24
6.2.5	Koeala 1094	25
6.3	Johtopäätökset	25
7	Pohdinta	26
7.1	Luotettavuus	26
7.2	Jatkotutkimustarpeet	26
	Lähteet	27

1 Johdanto

Drone- sekä sensoriteknologian kehittyminen ja laitteistokustannusten aleneminen kuluneen vuosikymmenen aikana ovat mahdollistaneet uusia kaukokartoitus- ja mittaussovellutuksia. Metsätaloudessa tämä avaa uusia mahdollisuuksia entistä tarkempien ja kustannustehokkaampien metsäinventointimenetelmien kehittämiseksi. Tässä työssä tarkastellaan fotogrammetrisen 3D-mittausmenetelmän soveltuvuutta metsäinventointiin.

Tämä työ tehtiin yhteistyössä Metsälinkki Oy:n ja MosaicMill Oy:n kanssa, jotka ovat vuodesta 2017 lähtien kehittäneet fotogrammetriaan perustuvaa metsäinventointimenetelmää yhdessä Simosol Oy:n sekä Metsä Group Oy:n kanssa. Kesällä 2018 menetelmällä tehtiin pilottihankkeessa metsäsuunnitelmia 3 500 hehtaarille Etelä- ja Länsi-Suomessa, ja vuodesta 2019 lähtien Metsä Group myy menetelmällä tehtyjä metsäsuunnitelmia vaihtoehtona perinteiselle metsäsuunnitelmalle (Metsä Group 2019).

Tutkimuksen vertailuaineisto on saatu Maanmittauslaitokselta, joka on mitannut puustotunnuksia perinteisin menetelmin Hämeen ammattikorkeakoulun Evon opetus- ja tutkimuskeskuksen ympäristöstä olevilta koelaitoilta. Opinnäytetyössä verrataan näiden kahden menetelmän tuottamia mittaustuloksia. Vertailuaineisto on vuodelta 2014, joten menetelmän tarkkuutta työllä ei voida määrittää. Lisäksi fotogrammetrisen menetelmän on päivittynyt huomattavasti vuoden 2018 jälkeen, joten tämänhetkistä tilannetta mittaukset eivät edusta.

2 Metsäinventointimenetelmät

Metsätietoa kerätään ja on kerätty lukuisiin eri tarkoituksiin siihen parhaiten soveltuvilla menetelmillä. Strategisen tason metsäsuunnittelu, kuten VMI, on perinteisesti perustunut koelähtöiseen ja maastomittauksiin, myöhemmin myös la-

serkeiläusaineistoihin, ja samoja periaatteita sovelletaan pienemmille alueille taktisen tason metsäsuunnittelussa, kuten metsäsuunnitelmien laadinnassa. Metsätietoa kerätään myös viranomaistarkoituksiin, esimerkkinä Kemera-tukien maastotarkastukset.

Fotogrammetriaan perustuva tiedonkeruumenetelmä on nimenomaan tiedonkeruuta, ja saatavaa dataa voidaan käyttää moniin eri tarkoituksiin. Kaikki edellä mainitut tehtävät olisi mahdollista hoitaa korkearesoluutioisten ilmakuvien avulla, joskin esimerkiksi VMI:n otanta- ja laskelmamenetelmiä tulisi tällöin muuttaa huomattavasti. Tässä työssä menetelmää käsitellään kuitenkin vain tarkkana, puukohtaisena inventointimenetelmänä taktisen tason (metsäsuunnittelun) tarkoituksiin.

2.1 Metsäinventointi perinteisin menetelmin

Kuvioittaista metsätietoa on perinteisesti kerätty metsätaloudessa koealaotannalla, maastokoealoilta sopivia tunnuslukuja mittaamalla ja tiedot koko kuviolle yleistämällä. Esimerkiksi metsäsuunnitelmaa tehtäessä metsäasiantuntija on valinnut mahdollisimman objektiivisesti kuviolta edustaviksi katsomiaan koealan paikkoja ja mitannut näiltä puuston kehitysluokkaan soveltuvia tunnuksia, kuten pohjapinta-alan ja keskipituuden. Hehtaariohtainen keskitilavuus on tämän jälkeen arvioitu relaskooppitaulukosta (Tapio 2014), tai tarvittavia toimenpiteitä on arvioitu harvennusmalleihin tukeutuen.

Metsikön maastoinventoinnissa käytetään apuvälineenä relaskooppia, jolla saadaan selville koealan pohjapinta-ala. Menetelmä ei vaadi rajoitetun koealan tekemistä. Mittaus suoritetaan rinnankorkeudelta (1,3 m), ja 360 astetta kiertäen laskeaan kaikki hahlon täyttävät rungot. Näistä jokainen vastaa yhden neliömetrin pohjapinta-alaa hehtaarilla.

Puun pituuden määrittämisessä käytetään yleisesti hypsometria (kuva 1). Kun puun korkeus mitataan 15 tai 20 metrin etäisyydeltä, mittaustulos voidaan lukea

suoraan laitteen asteikolta huomioon ottaen maaston kaltevuus ja laitteen mitauskorkeus (Suunto Oy 2019).

2.2 Metsäninventointi kaukokartoituksen keinoin

Kaukokartoitukseen perustuvia metsäninventointitapoja ovat ilma- ja satelliittikuvaus sekä laserkeilaus ja näiden erilaiset yhdistelmät. Yhteistä näille on kohteiden tarkastelu ilmasta. Sensorit voivat olla kiinnitettynä satelliittiin tai miehitettyyn tai miehittämättömään ilma-alukseen.

Merkittävimmät kaukokartoitukseen pohjautuvat inventointimenetelmät Suomessa ovat laserkeilaus ja lentokoneista suoritettava ilmakekuvaus. Metsäkeskus on vuodesta 2010 lähtien suorittanut yksityismetsien lentokoneesta suoritettavaa laserkeilausta, jossa puustotulkinta perustuu inventointialueelta mitattuihin maastokoealoihin ja näiden sekä vastaavan laserkeilausdatan pohjalta rakennetun alueellisen mallin pohjalta tehtäviin ennusteisiin (Packalen 2017). Ennuste tehdään 16 x 16 metrin hilaruuduille. Ongelmana käytettävässä harvapulssisessa laserkeilausinventoinnissa on usein puulajien tunnistaminen, joten laserkeilauksen tuoksi vaadittaisiin samalta ajankohdalta oleva ilmakekuvaus (Packalen 2017). Metsäkeskus julkaisee laserkeilausdatan pohjalta päivitettyä metsätietoa Metsään.fi-palvelussa.

Tässä työssä käytettävä fotogrammetrinen metsäninventointimenetelmä kuuluu kaukokartoitusinventointimenetelmiin. Sitä käsitellään kuitenkin laajemmin seuraavassa luvussa.

Metsäninventointia UAV-laitteistolla on viime vuosina kehitetty usealla taholla. Yleensä näissä on ollut tavoitteena jonkin tietyn piirteen havainnointi, esimerkiksi kirjanpainajatuhojen löytäminen (esim. Junttila, Holopainen, Vastaranta, Lyytikäinen-Saarenmaa, Kaartinen, Hyyppä & Hyyppä 2019). UAV-ilmakekuvasta ja fotogrammetriaa on lisäksi käsitelty useissa opinnäytetöissä (mm. Mäki 2018), mutta varsinaista puun mallintamista ja mittaamista fotogrammetrisesti ei liene julkisesti tutkittu.

2.3 Tarkan mittautiedon merkitys metsätaloudessa

Inventointitiedon tarkkuuden paraneminen yhdellä %-yksiköllä tarkoittaa metsänomistajalle noin 4 €:n lisätuloa hehtaaria kohden kymmenen vuoden ajanjaksolla (Kangas ym. 2018, 15). Tarkemmalle ja maastoinventointia objektiivisemmalle inventointitiedolle on siten tarvetta jo metsänomistajalla. Metsäteollisuudelle mahdollisimman tarkka inventointitieto on oleellista puuvirtojen hallinnan kannalta ja resurssien vapauttamiseksi tuottavampaan työhön kuin maastoinventointiin. Tarkka ja objektiivinen inventointitieto helpottaa lisäksi sähköistä puukauppaa, koska tiedon laatu tunnetaan.

Drone-ilmakuvausmenetelmä luo lisäksi uusia mahdollisuuksia visualisoinnin kautta. Esimerkiksi etämetsänomistamisen yleistyminen luonee kysyntää tilan ja hoitotoimenpiteiden visualisoinnille.

3 Fotogrammetria mittausmenetelmänä

3.1 Fotogrammetria

Fotogrammetria on 1800-luvun puolivälissä kehitetty mittausmenetelmä, jolla kohteita voidaan mallintaa ja mitata kolmiulotteisesti. Menetelmä perustuu siihen, että kuvattavan alueen tai esineen kukin piste on havaittavissa usealta valokuvasta, ja pisteen sijainti suhteessa ympäristöönsä kyetään sen perusteella määrittämään (Ahmad, Uddin & Goparaju 2018, 224 - 226). Jos kuvanottoaikan sijainti jossain koordinaatistossa lisäksi tunnetaan, voidaan kohteet sijoittaa kyseiseen koordinaatistoon.

Nykyisin käytettävät tietokoneohjelmat (esim. Agisoft) tunnistavat toisiaan vastaavat pisteet eri kuvilta automaattisesti ja laskevat näiden perusteella pistepilven, jossa jokaisella pisteellä on x-, y- ja z-koordinaatit. Fotogrammetrisesti voidaan mallintaa mitä tahansa kohteita, ja siinä käytettävät valokuvat voivat olla

millä menetelmällä tahansa otettuja. Tässä tutkimuksessa fotogrammetriaa käsitellään vain metsäilmakuvauksen näkökulmasta.

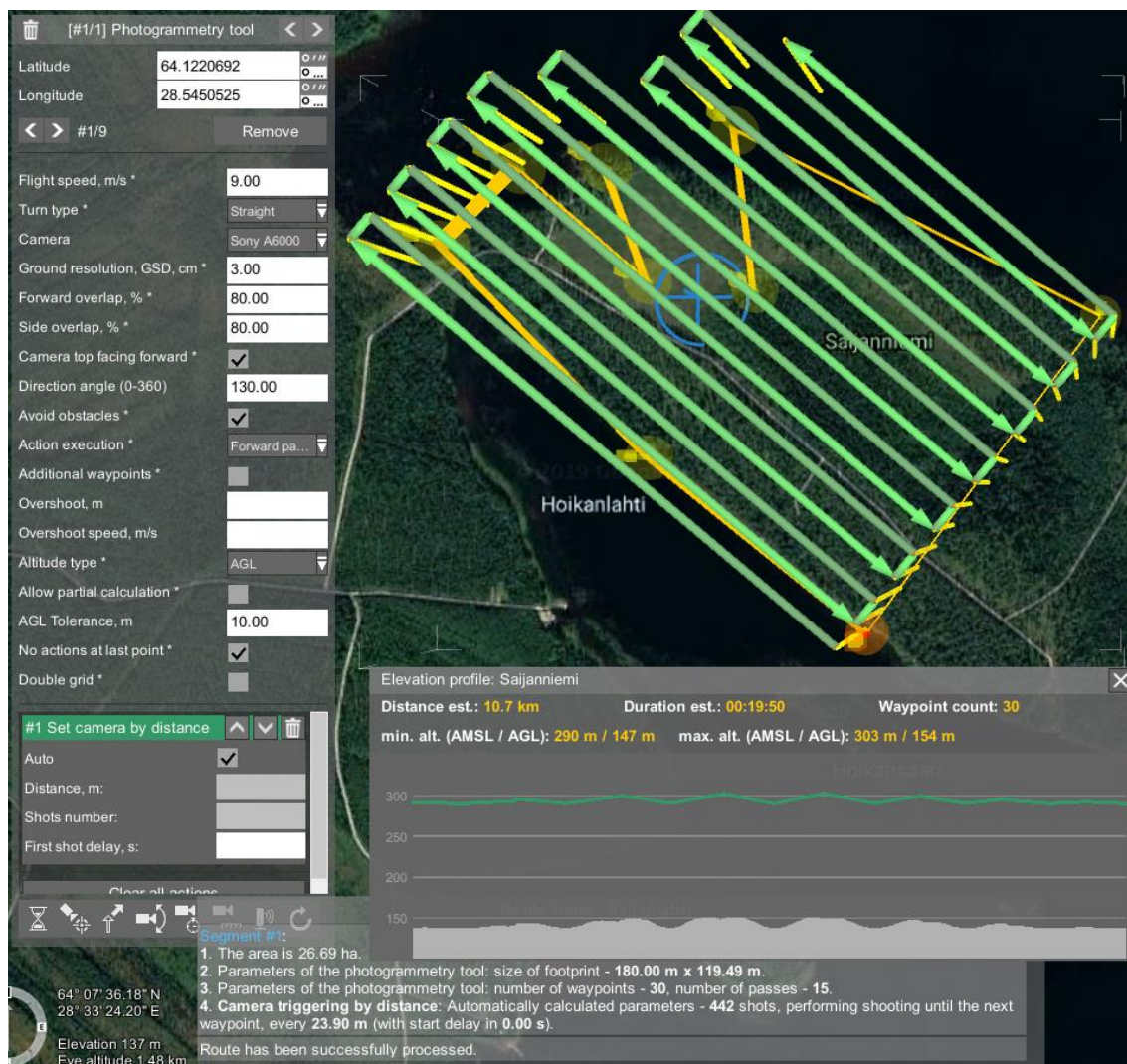
Ilmakuvauksen tapauksessa pistepilvestä voidaan edelleen tuottaa korkeusmalli, metsäilmakuvauksen tapauksessa latvusmalli. Näitä edelleen analysoimalla voidaan määrittellä puun pituus latvan ja maanpinnan välisenä erotuksena sekä latvuksen leveys. Puustotunnuksille, kuten rinnankorkeusläpimitalle, on olemassa latvuksen leveyteen ja puun pituuteen perustuvia malleja (Kalliovirta & Tokola 2005; Hyyppä, Holopainen, Vastaranta & Puttonen 2009). Näillä saadaan mallinnettua käyttökelpoisempia puustotunnuksia, kuten juuri rinnankorkeusläpimitta.

3.2 Fotogrammetria UAV-kuvauksessa

Miehittämättömään ilma-alukseen voidaan kiinnittää kamera tai kameroita, joiden kuvista voidaan laskea korkeusmalli sekä tuottaa ortokuva, ja näistä edelleen laskea edellä mainittuja tunnuksia. Tässä luvussa käydään läpi työvaiheiden prosessi. Esimerkkiaineisto on Sotkamossa sijaitseva tilalta – tätä dataa ei siis ole käytetty itse tutkimustehtävän analysointiin.

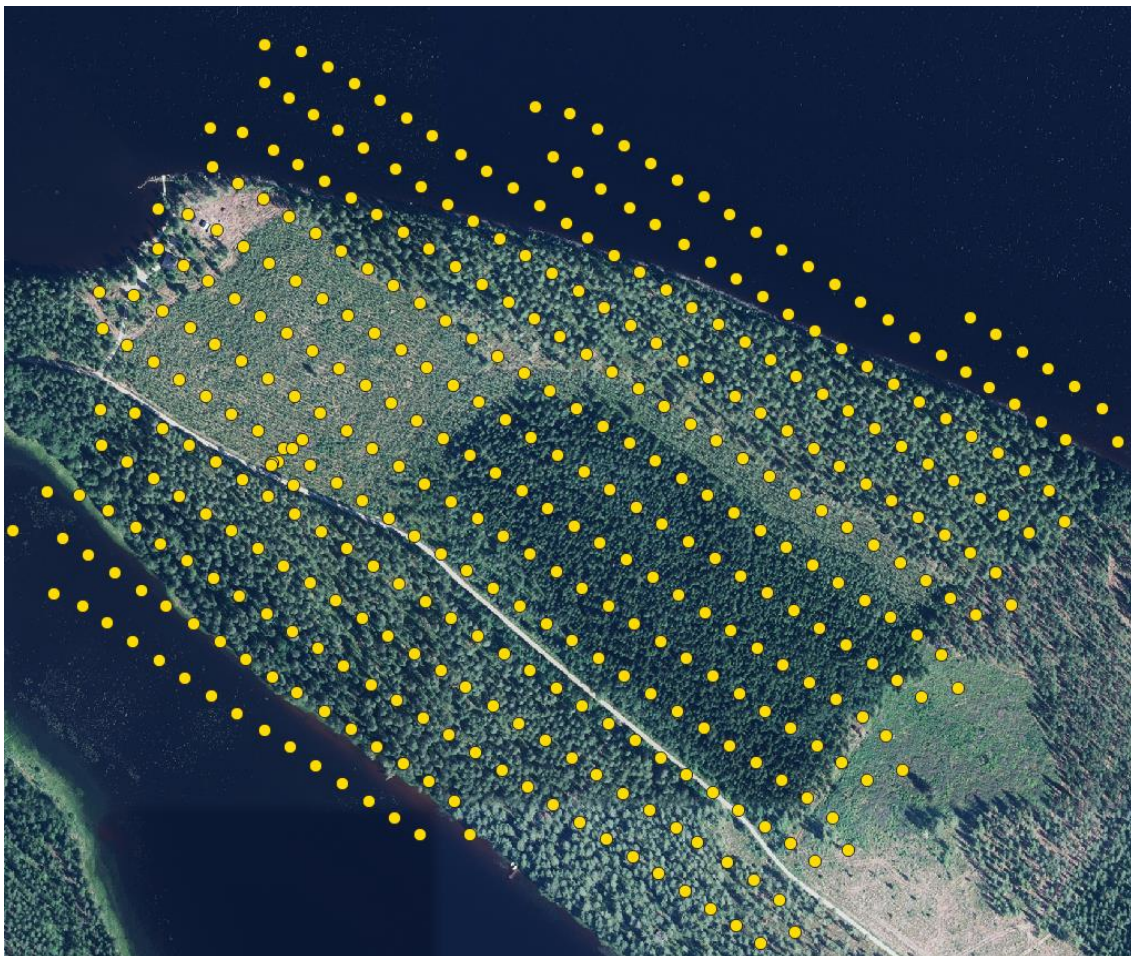
3.2.1 Lentojen suunnittelu

Lennot suunnitellaan laitevalmistajan ohjelmistolla; esimerkissä on tässä työssä käytetyn Videodrone Oy:n valmistaman Geodronen lentosuunnitteluohjelmisto (kuva 1). Lentojen suunnitteluvaiheessa määritellään kuvauskohteen luonteelle vaadittavat parametrit, tärkeimpänä pituus- ja sivuttaispeitto. Näillä tarkoitetaan, kuinka paljon vierekkäiset kuvat leikkaavat toisiaan pituus- tai sivusuunnassa. Metsä on huomattavasti vaikeampi kohde mallintaa kolmiulotteisesti kuin esimerkiksi maanpinta tai rakennus, joten peittosuhteen on oltava suuri; tässä tapauksessa 80 % sekä pituus- että sivusuunnassa. Kuvauskopteri liikkuu siis 0,2 kuvanmittaa eteenpäin kuvien oton välillä, ja kuvauslinjan päädyssä siirtyy 0,2 kuvanleveyttä sivusuunnassa.



Kuva 1. Lentojen suunnittelu Videodronen Ground Station -ohjelmistolla.

Esimerkkitapauksessa lentokorkeutena oli 150 metriä, ja kuvakooksi tuli maanpinnalla noin 180 x 120 metriä, joten kuvanottoaikojen väli on 24 metriä, ja kuvauslinjojen väli 36 metriä. Kuvassa 2 on havainnollistettuna kuvanottoaikojen toteutuminen; todellinen lennetty alue ei ole aivan sama kuin edellisessä suunnitelmakuvassa. Sivu- ja pituuspeiton ollessa 80 %, näkyy avaralla paikalla maassa oleva piste 25 kuvassa. Metsäkuvauksen tapauksessa tämä ei luonnollisesti toteudu jokaisessa puun osassa, mutta tiheä peitto takaa riittävästi havain-toja kaikkiin puun osiin.

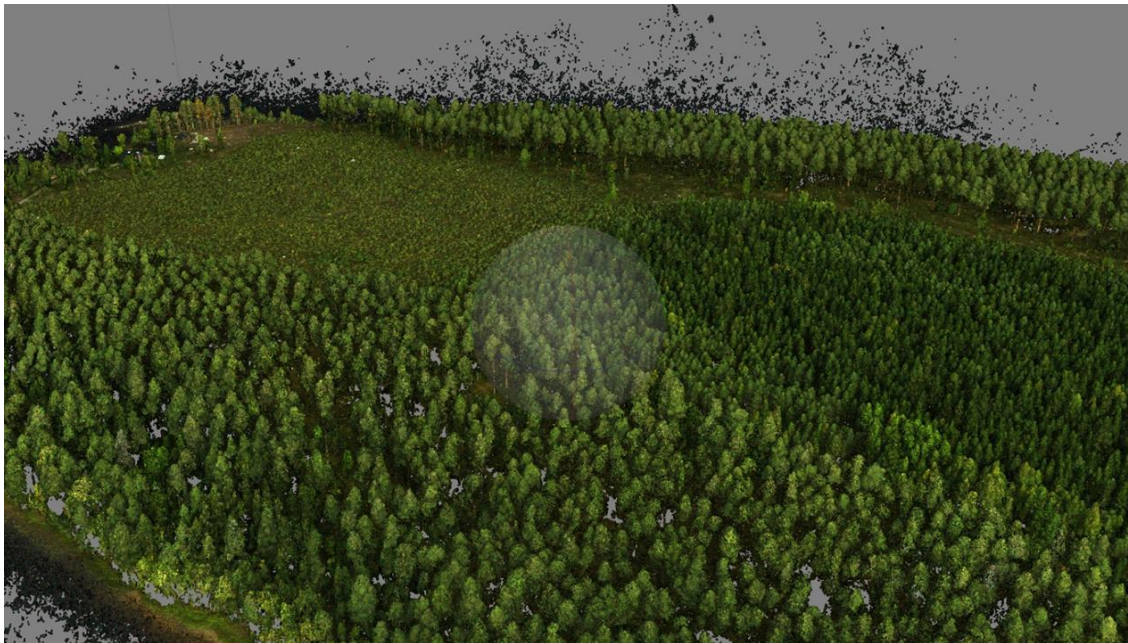


Kuva 2. Kuvanottoaikat. Lentolinjojen pituus on noin 650 metriä. Taustakuva: Maanmittauslaitoksen ortokuva (Maanmittauslaitos 2019).

3.2.2 Kuvien prosessointi

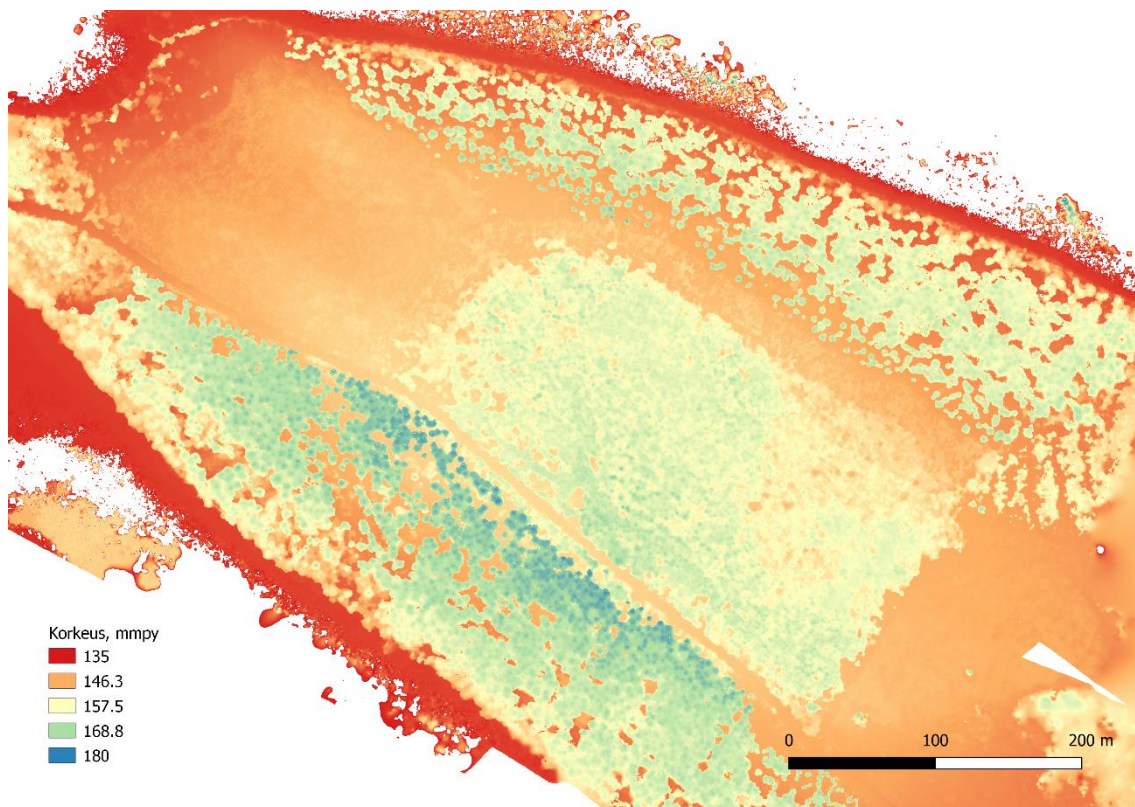
Ilmakuvat prosessoidaan jollain fotogrammetriaohjelmistolla, joita on esimerkiksi Agisoft Metashape (aiemmin Agisoft Photoscan) ja Pix4D. Tässä työssä on käytetty Agisoft-ohjelmistoa. Ohjelmistoon syötetään kuvat sekä kuvanottoaikojen sijainnit, ja tämän jälkeen suunnataan kuvat – ohjelmisto tunnistaa pienen määrän yhteisiä pisteitä eri kuvilta ja luo näistä harvan pistepilven, jossa voi olla esimerkiksi 100 000 pistettä, ja päättelee näin tarkan kuvanottosuunnan (Agisoft 2019, 11). Tämän jälkeen rakennetaan tiheä pistepilvi, jossa voi halutusta laadusta riippuen olla kymmeniä miljoonia pisteitä tyypillisellä 20–30 hehtaarin kuvausalueella (kuva 3). Kuvassa taustalla näkyvät pisteet ovat varsinaisen kuvausalueen ulkopuolella olevia pisteitä, jotka näkyvät mahdollisesti vain uloim-

milla kuvilla, ja siksi nuo pisteet ovat kaukana oikeasta; lisäksi vedenpinnan mallintaminen fotogrammetrisesti on muutenkin vaikeaa, koska siinä ei ole tunnistettavia kohteita.



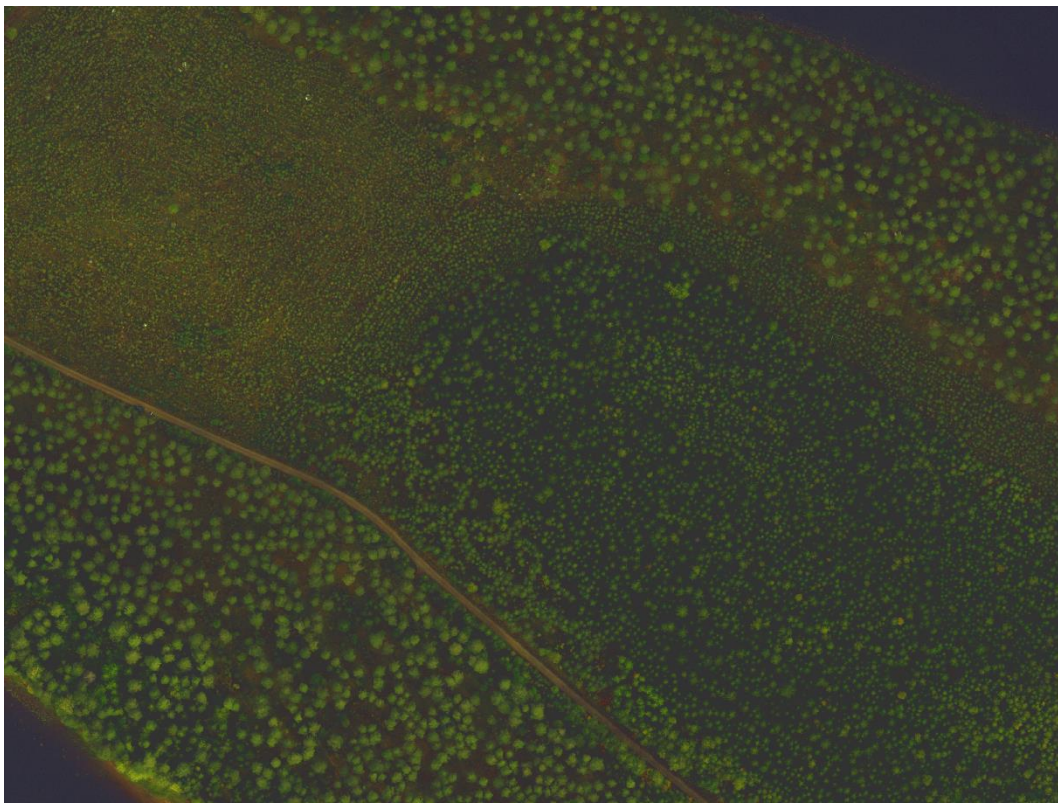
Kuva 3. Tiheä pistepilvi. Tarkastelusuuntana pohjoinen.

Tiheästä pistepilvestä voidaan edelleen rakentaa korkeusmalli, DEM (Digital Elevation Model). Paraslaatusin korkeusmalli saadaan nimenomaan tiheästä pilvestä, mutta se on mahdollista rakentaa myös harvasta pistepilvestä. Edelliseltä alueelta rakennettu korkeusmalli on kuvassa 4.



Kuva 4. Korkeusmalli.

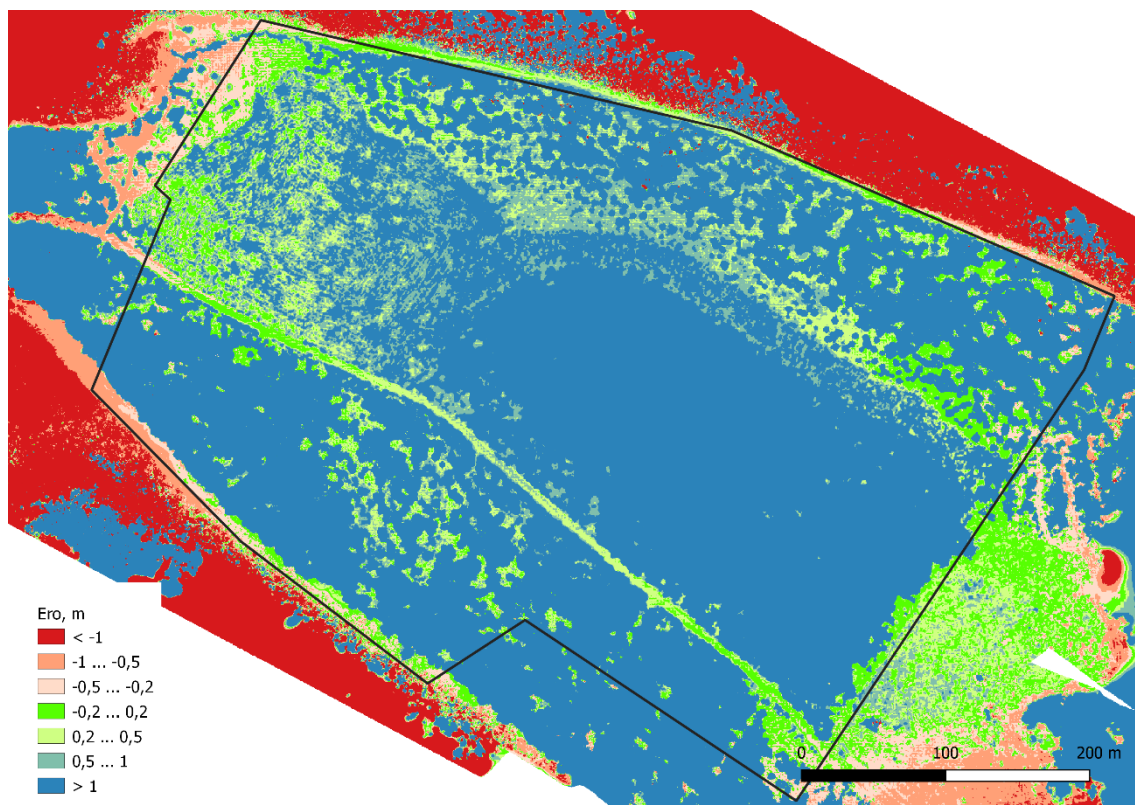
Kun korkeusmalli on olemassa, voidaan alueelta tuottaa myös ortomosaiikki. Ortokuva tarkoittaa ilmakuvaa, josta on poistettu maaston korkeuseroista johtuvat mittakaavaerot (Haggrén 2002, 1). Ortokuvassa katseluperspektiivi on aina ylhäältäpäin, vaikka alkuperäisissä yksittäisissä kuvissa tarkastelu tapahtuukin kuvanotto paikasta; toisin sanoen kuvan reunoilla olevat kohteet nähdään viistosti. Ortomosaiikista voidaan siten mitata erilaisia kohteita, ja mittakaava pysyy koko ajan samana. Metsäinventoinnissa ortokuvalta voidaan määrittellä esimerkiksi latvuksien halkaisijat. Ortomosaiikki on kuvassa 5.



Kuva 5. Ortokuva.

3.2.3 Korkeusmallin tarkkuus ja maan pintamallin käyttökelpoisuus

Edellisen esimerkitapauksen tulosten tarkkuutta havainnollistetaan seuraavassa vielä vertaamalla tuloksia Maanmittauslaitoksen laserkeilauksien pohjalta tekemään maastomalliin, jonka pikselikoko on kaksi metriä ja tarkkuus 0,3–0,7 metrin välillä (Maanmittauslaitos 2019). Koska fotogrammetrisesti tuotettu korkeusmalli on pintamalli sisältäen puut, täytyy vertailu tehdä puuttomilla kohteilla. Metsätiet ovat hyvin lähellä MML:n mallia, samoin maanpinta siellä, missä puusto on riittävän harvaa (kuva 6). Avoimet paikat eroavat enimmäkseen korkeintaan 20 cm MML:n mallista. Kuvassa on rajattuna myös alue, joka kuvauksella oli tarkoitus mitata. Pian sen ulkopuolella korkeusmalli alkaa vääristyä enemmän.



Kuva 6. Korkeusmallin ero MML:n korkeusmalliin.

Suurelta osin latvusto on esimerkkitapauksessa niin sulkeutunut, että maanpintaa ei välttämättä ole korkeusmallissa lainkaan mukana. Lisäksi, vaikka valta-
puusto olisi riittävän harvaa, voivat aluskasvillisuus ja aluspuusto "nostaa" korkeusmallia ylemmäs. Siksi maastomallin erottaminen fotogrammetrisestä korkeusmallista ei tuottaisi luotettavaa maanpinnan mallia. Tämä voidaan kiertää käyttämällä MML:n maastomallia.

4 Opinnäytetyön tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia fotogrammetrisen metsäinventointimenetelmän käyttökelpoisuutta ja luotettavuutta. Koska vertailuaineistona olevat maastomittaukset on tehty neljä kasvukautta ennen dronella suoritettuja ilmakuvauksia, eikä mittaustuloksia voitu mallintaa luotettavasti nykypäivään, ei tavoitteena voinut olla inventointimenetelmän tarkkuuden testaaminen. Vaikka tutkimusase-

telma ei ollut täydellinen, oli inventointimenetelmän käyttökelpoisuuden testaaminen ja tarkastelu nyt käytettävissä olevalla tarkkuudella tärkeää, koska kyseessä on ensimmäinen kaupallinen metsäsuunnittelupalvelu, jossa data tuotetaan fotogrammetrisesti drone-ilmakuvista.

5 Aineisto ja menetelmät

5.1 Aineiston hankinta ja prosessointi

Ilmakuvaukset tehtiin Evolla syyskuussa 2018, ja data saatiin myös opinnäytetyökäyttöön. Pistepilvien laskemisen ja jatkoanalyysin sekä puustotunnusten tuottamisen on tehnyt MosaicMill Oy. Vertailuaineisto on saatu käyttöön Maanmittauslaitokselta.

Ilmakuvaus suoritettiin VideoDrone Oy:n Geodrone-kuvauskopterilla, kameroina oli kaksi Sonyn A6000-kameraa, joista toinen oli tavallinen RGB-kamera ja toinen muokattu niin että se tallensi myös lähi-infra-aallonpituusaluetta. Lentokorkeus oli 150 metriä, jolloin kuvakooksi maassa tuli 180 x 120 metriä. Lentolinjojen väli oli 36 metriä, eli kuvat olivat sivuttaissuunnassa 80 % päällekkäin. Kuvanottoväli oli 24 metriä, eli myös pituuspeitto lentolinjojen suunnassa oli 80 %.

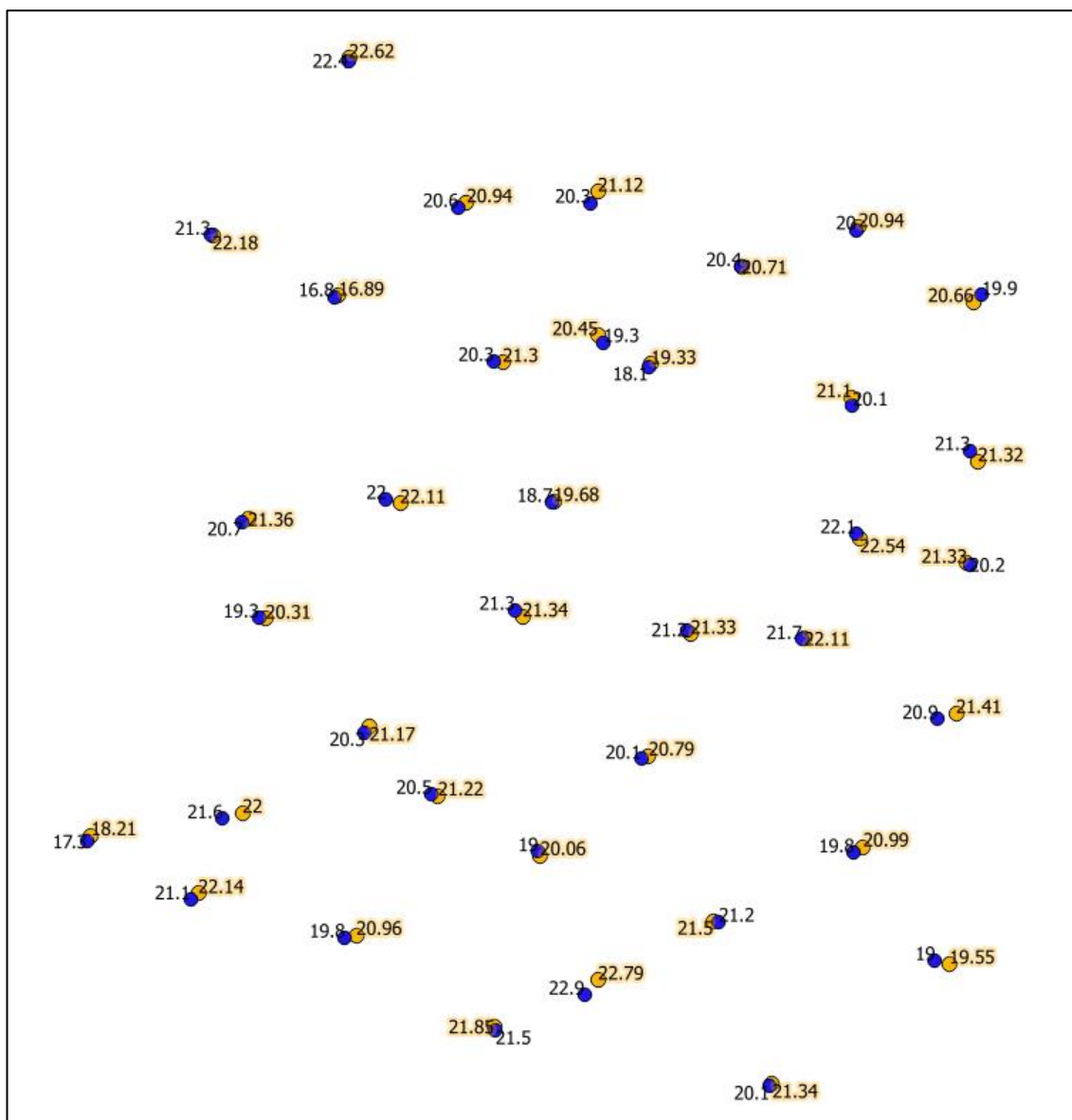
MosaicMill Oy on prosessoinut kuvat 3.2-luvussa kuvatulla menetelmällä, ja tämän jälkeen käyttänyt itse luomiaan työkaluja puiden tunnistamiseen sekä latvusten läpimittojen ja puiden pituuksien määrittelyyn. Tämän jälkeen rinnankorkeusläpimitta on mallinnettu olemassa olevilla alueellisilla latvus-/läpimittamalleilla (Kalliovirta & Tokola 2005). Puulaji määritellään automaattisesti (Sarkeala 2019). Tätä työtä varten on saatu MosaicMill Oy:ltä aineisto, jossa on puiden sijainnit, latvuksen läpimitta, puun pituus ja rinnankorkeusläpimitta.

Maanmittauslaitos on mitannut koealojen puut vuonna 2014 (Xinlian 2018). Koealoja oli kuusi ja kunkin koko 30 x 30 m. Puista on mitattu pituus ja rinnankor-

keusläpimitta. Alueet olivat vaihtelevia puustoltaan: yksi koealoista oli päätehakkuukypsää männikköä, ja osassa alueita oli tiheää alikasvosta. Alueella oli tehty harvennuksia, mutta niissä poistetut puut oli poistettu MML:n aineistosta.

5.2 Aineiston suodatus ja mittaustulosten vertaaminen

Puudata-aineistot eivät olleet yhtenevät, eli molemmista puuttui puita, joita oli toisessa aineistossa. Tämän takia kaikki vastinparittomat puut suodatettiin pois aineistosta. Tyypillinen tilanne vastinparin löytymättömyydelle oli, jos valtapuuston alla kasvoi puustoa alikasvoksena. Mikäli valtapuuston latvuskerros on riittävän peittävä, eivät alispuut näy ilmakuvissa ja ne jäävät mittauksessa ja prosessoinnissa löytymättä. Esimerkki suodatetusta koealasta on kuvassa 8.



Kuva 8. Koeala 1002. Arvot pituuksia (m). Värit: Drone oranssi, MML sininen.

Kun kaikille puille oli vastinparit, verrattiin näiden pituutta sekä rinnankorkeusläpimittaa. Näille laskettiin sopivia tunnuslukuja, sekä tarkasteltiin tulosten uskottavuutta loogisesti. Alueista yksi päätettiin jättää kokonaan vertailun ulkopuolelle, koska vastinpareja oli mahdoton osoittaa riittävän luotettavasti.

Metsää harkittiin myös kasvatettavan vuoden 2014 mittaustuloksista vuoteen 2018 Motti-metsäsimulointiohjelmistolla, ja verrattavan tuloksia niihin. Tässä menetelmässä olisi ollut ongelmana lähtötietojen epätarkkuus (esim. jaksolle osuheet hakkuut ja niiden vaikutus kasvuun), ja että Motti-ohjelmisto ilmoittaa simuloinnin tuloksen ainoastaan valtapuustolle. Lisäksi koealojen puusto poikkesi vaikiintuneista kasvatusmalleista, mikä aiheutti epävarmuutta. Referenssiaineistoksi

simuloitiin kuitenkin kolme kasvatusskenaariota, ja tarkasteltiin valtapuuston pitiuuden ja läpimitan kasvua neljän vuoden aikana (taulukko 1). Taulukon tuloksia voidaan käyttää suuntaa-antavana aineistona vertailtaessa maastomittausten ja fotogrammetrisen menetelmän tuloksia.

Taulukko 1. Motti-simuloinnit kolmelle kasvatusskenaariolle (Metla 2015).

#	Puu-laji	Kasvu-paikka	Ikä, v	Runko-luku/ha	Keski-pituus	Keski-lpm	Pituus-kasvu/4 a	Lpm:n kasvu/4 a	Vastaava koeala
1	Mänty	MT	60	500	19,4	23,84	0,8	0,96	1 002
2	Kuusi	MT	65	400	26,8	33,25	0,4	0,72	1 060
	Kuusi	MT	25	500	7,7	8,7	0,72	0,48	
3	Koivu	MT	45	600	20,7	20,16	1,2	0,88	1 094

6 Tulokset

Tulokset käydään läpi ensin kokonaisuudessaan ja sitten koealoittain. Tuloksissa verrataan ainoastaan molempien menetelmien mittaustuloksia (h, d_{1.3}) sekä puulajeja, mutta ei mittauksista johdettuja muita tunnuksia, kuten tilavuutta.

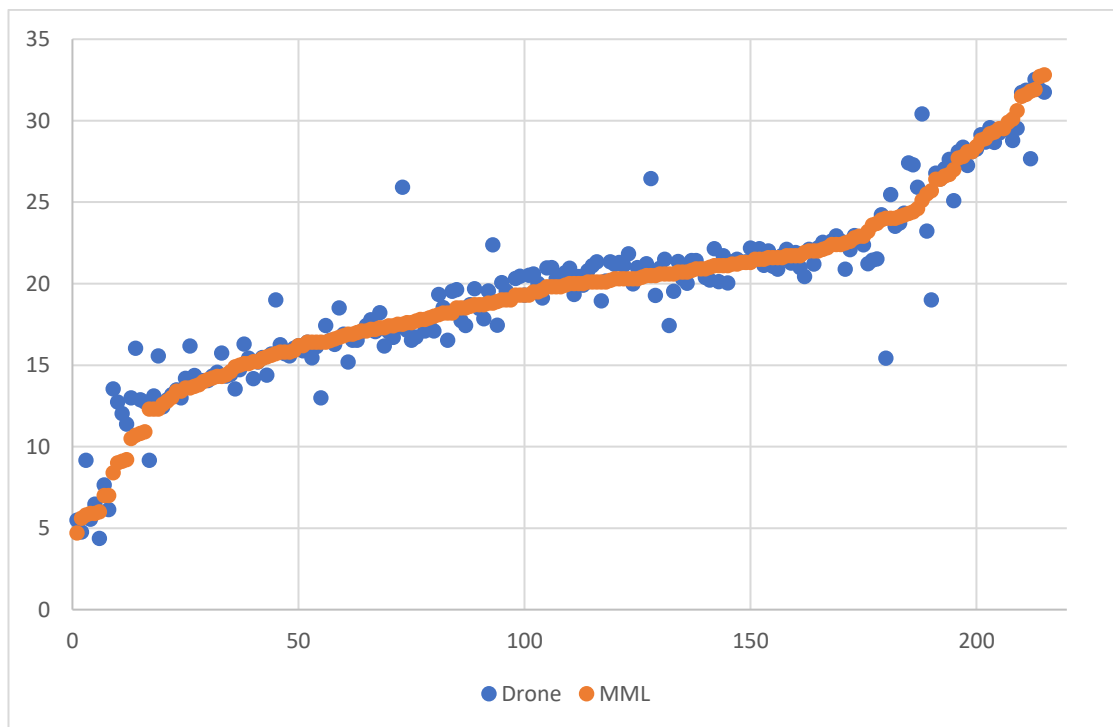
6.1 Kaikki koealat

Taulukossa 2 on koostettuna kaikkien koealojen tulokset. Loogisesti vuoden 2018 mittaustulokset ovat hieman suurempia kuin MML:n vuoden 2014 mittaukset, mutta etenkin pituudessa ero on mahdollisesti liian pieni.

Taulukko 2. Kaikkien koealojen kaikkien puiden pituus ja läpimitta.

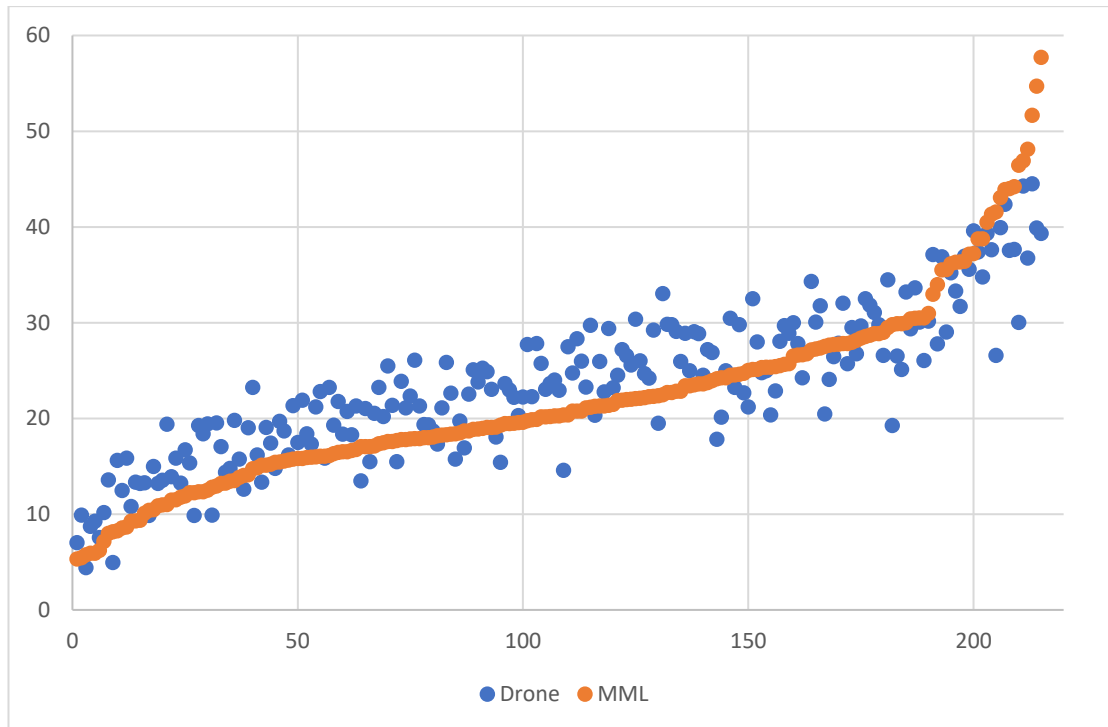
Pituus (m)	MML	Drone	Erotus
Keskiarvo	19,40	19,56	0,17
Mediaani	19,80	20,03	0,11
Keskihajonta	5,47	5,32	1,65
Lpm (cm)	MML	Drone	Erotus
Keskiarvo	21,96	23,62	1,66
Mediaani	20,25	23,25	2,62
Keskihajonta	9,47	7,74	4,60

Keskihajonnasta voi päätellä, että osa mittaustuloksista on pienempiä kuin maastomittausten tulos, ja saman voi todeta kuvioista 1, jossa kaikki puuvastinparit on järjestetty MML:n maastopittausten mukaiseen suuruusjärjestykseen. Kukin piste tarkoittaa yhtä puuta, ja x-akselilla samalla kohdalla olevat havainnot ovat samasta puusta. Näissä tapauksissa vähintään toinen mittauksista on loogisesti virheellinen. Muutamia paljon poikkeavat havainnot ovat mahdollisesti virheitä vastinparien nimeämisessä.



Kuvio 1. Aineiston kaikkien puiden (n=215) pituus (m) maastossa ja fotogrammetrisesti mitattuna.

Kaikkien puiden läpimitta oli v. 2018 mittauksissa keskimäärin 1,66 cm suurempi kuin MML:n mittauksessa, mediaanin ollessa 2,62 cm. Ero on mahdollinen, joskin referenssisimulointeihin verrattuna hieman suurehko. Kaikkein järeimpien puiden läpimitta on aliarvioitu, koska latvus-pituusmalleja ei ole rakennettu näin poikkeaville puille (kuvio 2).



Kuvio 2. Aineiston kaikkien puiden (n=215) rinnankorkeusläpimitta (cm) maastossa ja fotogrammetrisesti mitattuna.

Puulajien tunnistus on esitetty taulukossa 3. Lähtötiedon voidaan olettaa olevan täysin oikean, joten virheet lajinmäärityksessä ovat joko prosessoinnin tai aineiston käsittelyn virheitä. Eniten virhettä on kuusen ja koivun erottamisessa toisistaan.

Taulukko 3. Puulajitunnistus. Vaakarivillä todellinen puulaji.

	Mänty	Kuusi	Koivu	Yhteensä	Oikein
Mänty	91	7	0	98	92,9 %
Kuusi	2	36	5	43	83,7 %
Koivu	2	4	68	74	91,9 %
Yhteensä				215	90,7 %

Tuloksia tarkasteltiin myös puulajeittain (taulukko 4). Koivun pituus on jälkimmäisissä mittauksissa pienempi. Hypsometrimittauksen keskivirhe 20-metrisellä puulla on 0,5–0,7 metriä (Ärölä 2008, 274), joten vaikka koivujen maastomittauksissa olisi tullut systemaattisesti liian suuria mittaustuloksia, olisi fotogrammetrisen menetelmän tuottamat koivujen pituudet liian pieniä, koska neljän vuoden pituuskasvu on Motti-simulaatioiden perusteella todennäköisesti ollut vähintään metrin. Fotogrammetrisesti rakennettu korkeusmalli tyypillisesti aliarvioi terävien

kohteiden korkeutta (Sarkeala 2019), ja latvuksien korkeutta korjataan tietyillä kertoimilla. Jatkotutkimuksen aihe on, onko kertoimissa puulajien välillä korjattavaa. Mallinnetun läpimitan kasvu männyllä on puolestaan korkeahko suhteessa kuuseen, mutta jatkotutkimus on tarpeen myös tämän syiden tarkempaan selvittämiseen.

Taulukko 4. Pituus ja läpimitta puulajeittain.

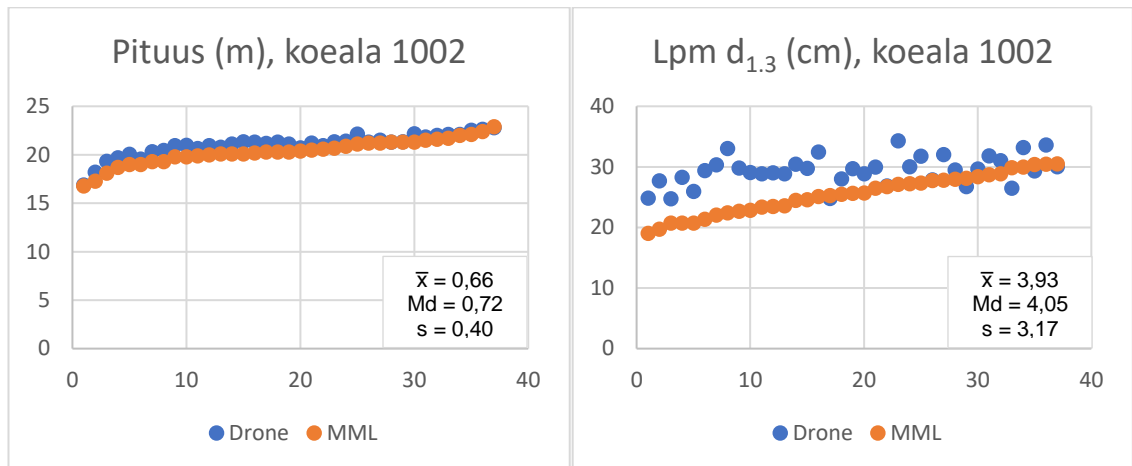
Pituus (m)	Mänty	Kuusi	Koivu
MML, keskiarvo	18,30	19,71	20,66
Drone, keskiarvo	18,57	20,33	20,44
Erotus, keskiarvo	0,27	0,62	-0,23
Erotus, mediaani	0,13	0,38	-0,40
Erotus, keskihajonta	0,98	2,38	1,79
Läpimitta ($d_{1,3}$) (cm)	Mänty	Kuusi	Koivu
MML, keskiarvo	23,49	23,00	19,34
Drone, keskiarvo	26,30	23,33	20,23
Erotus, keskiarvo	2,81	0,33	0,89
Erotus, mediaani	3,67	1,33	1,88
Erotus, keskihajonta	4,73	3,86	4,51

6.2 Tulokset koealoittain

Tulokset esitetään myös koealoittain, koska tavoitteena on myös todentaa, onko menetelmällä eroja erilaisissa metsissä. Koealojen tulostiivistelmäkuvioissa ovat keskiarvo, mediaani ja keskihajonta on laskettu mittaustulosten erotukselle, siten että vuoden 2018 tuloksista on vähennetty aikaisempi.

6.2.1 Koeala 1002

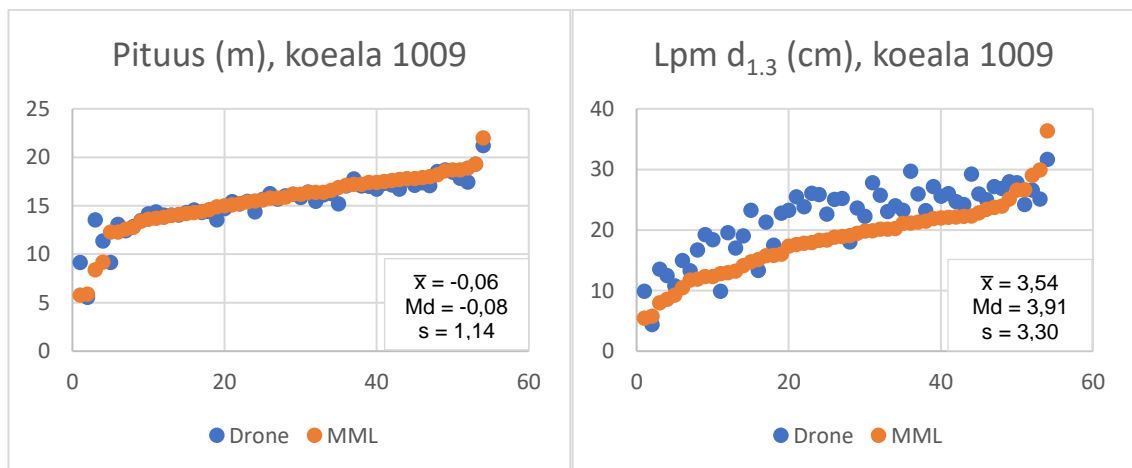
Tasaikäisrakenteinen, päätehakkuuikää lähestyvä mäntymetsä oli pituuden osalta helpoin kohde (kuvio 3). Pituuskasvu on lähellä vastaavaan metsään tehtyä Motti-simulointia, jonka tulos oli 0,8 metriä neljän vuoden aikana. Rinnankorkeusläpimitta oli sitä vastoin mallinnettu Motti-simulointia suuremmaksi. Tiedossa ei ole, kuuluuko kyseinen kuvio vuoden 2014 jälkeen harvennettuihin – mikäli kuuluu, olisi latvus voinut kasvaa ja tämä selittäisi läpimittatuloksen.



Kuvio 3. Koealan 1002 pituus ja läpimitta.

6.2.2 Koeala 1009

Koeala 1009 oli puustoltaan samankaltainen edellisen koealan kanssa, eli alue oli mäntyvaltaista. Pituusmittaustulokset olivat keskimäärin lähes samoja kuin vertailuaineistolla (kuvio 4). Läpimittatulokset muistuttivat koealan 1002 tuloksia.

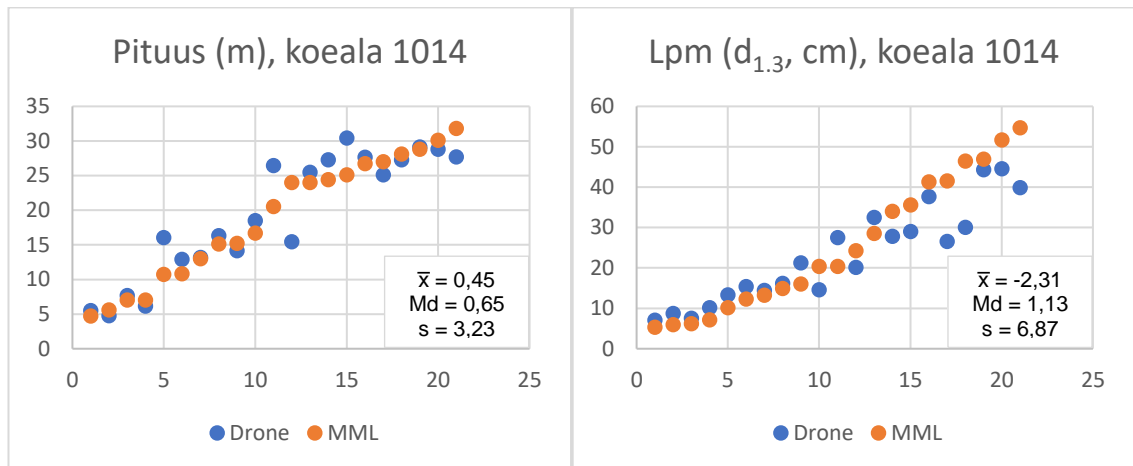


Kuvio 4. Koealan 1009 pituus ja läpimitta.

6.2.3 Koeala 1014

Kolmas koeala poikkesi puustoltaan huomattavasti edellisistä (kuvio 5). Ylimpänä kerroksena oli hyvin järeitä lehtipuita, joista muut paitsi koivu suodatettiin tästä

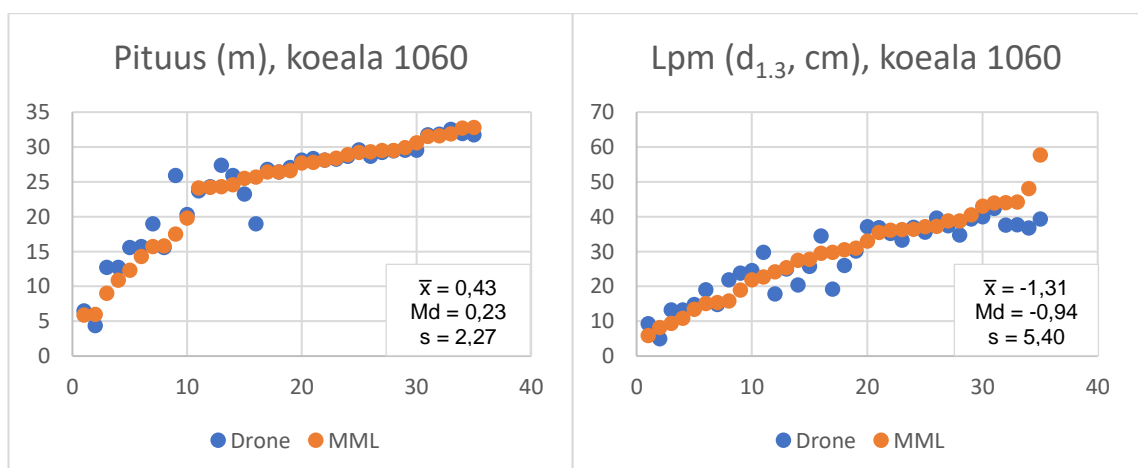
aineistosta pois. Alikasvoksena oli kuusta, joista suurin osa jäi lehtipuiden latvuk-sien alle, eivätkä siten näkyneet ilmakuvauksessa lainkaan. Suurimmat puut oli-vat niin epätyypillisiä, että läpimittamalli aliarvioi niiden läpimitan selvästi. Medi-aani on siksi tässä tapauksessa keskiarvoa parempi tunnusluku kuvaamaan lä-pimitan eroa.



Kuvio 5. Koealan 1014 pituus ja läpimitta.

6.2.4 Koeala 1060

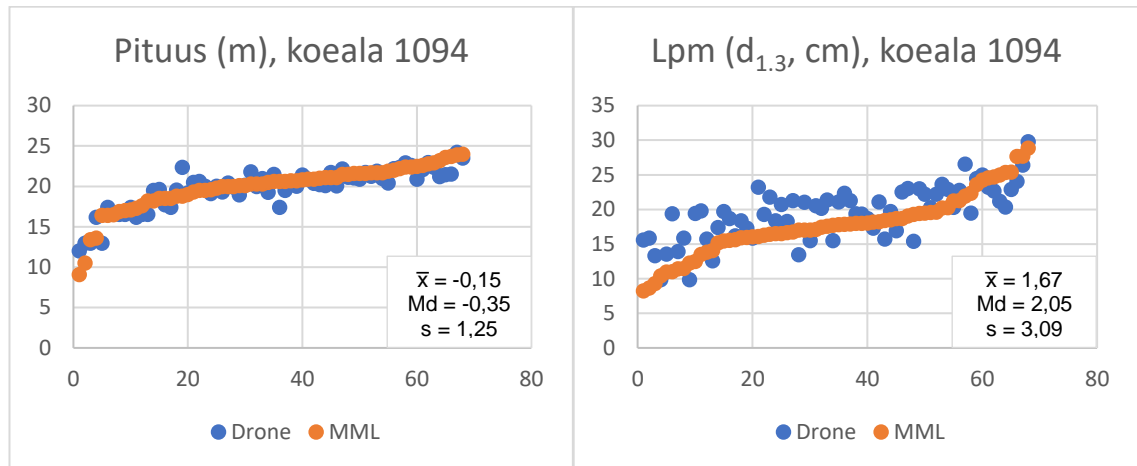
Neljäs koeala oli tutkimuksen ainoa puhdas kuusikko. Vallitseva jakso muodostui jopa yli 30-metrisistä kuusista, ja näiden alle jäi noin 3–8-metrinen alikasvoskuu-sikko. Valtaosa näistä jäi odotetusti löytymättä ilmakuvamenetelmällä. Jälleen jä-reimpien puiden ($d_{1.3} > 40$ cm) läpimitta on aliarvioitu (kuvio 6).



Kuvio 6. Koealan 1060 pituus ja läpimitta.

6.2.5 Koeala 1094

Koivu-kuusi-sekametsä, jossa koivut olivat vallitsevana jaksona (kuvio 7). Koivujen pituudet jäivät hieman neljä vuotta aiemmasta. Suurin osa kuusista oli 3–12 metriä pitkiä, ja nämä jäivät jälleen enimmäkseen koivun latvuksien alle. Koivun läpimitan kasvu on realistinen.



Kuvio 7. Koealan 1094 pituus ja läpimitta.

6.3 Johtopäätökset

Eriaikaisista mittausajankohdista johtuen kaikkiin tuloksiin täytyy suhtautua varauksella. Kuitenkin, rakenteellisesti menetelmän voi katsoa toimivan, kuten on tarkoitettukin ja mahdollisia virhelähteitä on mahdollista korjata laskentaparametrein. Koealojen erojen perusteella tasaikäisrakenteisessa metsässä menetelmä tuottaa tarkimpia tuloksia. Useajaksoisessa metsässä alempi jakso jää usein latvuksien alle eikä erotu puutunnistuksessa. Puun pituudella ympäristöönsä nähden ei sinänsä ole väliä; menetelmä ei ennusta tai ennakoita mitään, vaan käsittelee jokaisen puun omana yksikkönään.

Huolimatta tutkimusasetelmaan liittyneistä epävarmuustekijöistä, voidaan todeta menetelmän olevan vähintäänkin käyttökelpoinen. Metsä Groupin omissa tarkkuuskontrollimittauksissa on päädytty samaan päätelmään, minkä seurauksena menetelmä on otettu varsinaiseksi metsäsuunnittelumittausmenetelmäksi vuodesta 2019 alkaen.

7 Pohdinta

7.1 Luotettavuus

Koska aineistot ovat eri vuosilta, täytyi luotettavuutta arvioida tavallistakin kriittisemmin. Työllä ei voida katsoa olevan todistusarvoa menetelmän tarkkuudesta, lähinnä voitiin todeta menetelmän uskottavuus. Epävarmuutta aiheutti lisäksi joillakin kuvioilla tehdyt harvennukset, tosin niissä poistetut puut on ainakin pyritty poistamaan myös maastomittausaineistosta. Puiden tunnistaminen ja yhdistäminen eri aineistoista oli joissakin tapauksissa vaikeaa, etenkin jos koealan puusto oli huomattavan tiheää ja erirakenteista.

7.2 Jatkotutkimustarpeet

Aihe vaatii paljon lisätutkimusta, ensimmäiseksi sama tutkimus toistettuna samanaikaisilla mittauksilla, jotta menetelmän tarkkuus voitaisiin yksiselitteisesti todeta. Lisäksi käytetty menetelmä on kehittynyt huomattavasti kesästä 2018 jo kesälle 2019 ja tarkkuus oletettavasti parantunut.

Käytettyjen mallien ja korjauskertoimien oikeellisuutta on syytä selvittää lisää; esimerkiksi tulisiko pituuskorjauskertoimia korjata puulajien välillä. Samoin tulisi selvittää, kuinka kuvaushetken tuulisuus vaikuttaa tuloksiin. Jos kuvaushetkellä on voimakas tuuli, aliarvioituvatko pituudet enemmän kuin tyynellä, ja vaihteleeeko tämä puulajien välillä.

Lähteet

- Agisoft. 2019. Agisoft PhotoScan User Manual. https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf. 18.5.2019.
- Ahmad, F., Uddin, M. & Goparaju, L. 2018. 3D Mapping by Photogrammetry and LiDAR in Forest Studies. *World Scientific News* 95. <http://psjd.icm.edu.pl/psjd/element/bwmeta1.element.psjd-e39f5408-d0e5-4d95-b9a6-3ac7d935ae04>.
- Haggrén, H. 2005. Luento 7: Ortokuvien tuottaminen. https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/7/L7_2005.pdf. 18.5.2019.
- Hyyppä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M. & Puttonen, E. 2009. Yksittäisten puiden mittaus ja muutosten seuranta laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009. <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6337.pdf>.
- Junttila, S., Holopainen, M., Vastaranta, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Kaartinen, H., Hyyppä, J., Hyyppä, H. 2019. The potential of dual-wavelength terrestrial lidar in early detection of *Ips typographus* (L.) infestation – Leaf water content as a proxy. *Sarjassa Remote Sensing of Environment* vol. 239. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425719302834?via%3Dihub>. 5.9.2019.
- Kalliovirta, J & Tokola, T. 2005. Functions for Estimating Stem Diameter and Tree Age Using Tree Height, Crown Width and Existing Stand Database Information. *Sarjassa Silva Fennica* vol. 39 no. 2 article 386. <https://www.silvafennica.fi/article/386/keyword/forest+inventory>. 22.5.2019.
- Kangas A., Gobakken T., Puliti S., Hauglin M. & Naesset E. 2018. Value of airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry data in forest decision making. *Silva Fennica* vol. 52 no. 1 article id 9923. <https://doi.org/10.14214/sf.9923>. 22.5.2019.
- Maanmittauslaitos. 2019a. Maanmittauslaitoksen ortokuva. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/ortokuva>. 18.5.2019.
- Maanmittauslaitos. 2019b. Korkeusmalli 2 m. <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/korkeusmalli-2-m>. 18.5.2019.
- Metla. 2015. MetINFO - MOTTI-ohjelmisto. <http://www.metla.fi/metinfo/motti/>. 20.5.2019.
- Metsä Group. 2019. Metsä Group: Drone-metsäsuunnitelma haastaa perinteisen metsäsuunnittelun. <https://www.metsaforest.com/fi/Yritys/Tiedotteet/Pages/Tiedote.aspx?EncrypteddId=D4A1DE7C0E797C64&Title=MetsaGroup:Drone-metsasuunnitelmahaastaaperinteisenmetsasuunnittelun>. 21.5.2019.
- Metsäkeskus. 2015. <https://www.metsakeskus.fi/tiedotteet/suomen-yksityismetsista-maailman-parhaat-tiedot-yli-10-miljoonaa-hehtaaria-kartoitettu>.
- Mäki, H. 2018. Drone-kuvadatan tuottaminen, analysointi ja fotogrammetria. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Packalen, P. 2017. Laserkeilausseminaari 2017.
- Sarkeala, J. 2019. Haastattelu. 8.5.2019.
- Suunto Oy. 2019. Hypsometri. http://www.manualsdir.com/manuals/149875/suunto-pm5-pm-5_1520.html?page=81. 22.5.2019.

Tapio. 2014. Tapion maastotaulukot.

Xinlian, L. 2018. Sähköposti. 15.10.2018.

Ärölä, E. 2008. Metsävarojen mittaus ja arviointi. Teoksessa Rantala, S. (toim.).
Tapion taskukirja. Hämeenlinna: Metsäkustannus Oy, 271–315.