

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Metsätalouden koulutus

Sampo Taipale

METSIKÖN TILAJÄRJESTYSMITTAUSMENETELMIEN VERTAILU

Opinnäytetyö
Joulukuu 2019



OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2019
Metsätalouden koulutus

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
013 260 600

Tekijä(t)
Sampo Taipale

Nimeke
Metsikön tilajärjestysmittausmenetelmien vertailu
Toimeksiantaja
Virtuaalimetsä 2.0

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla erilaisia tilajärjestyksen mittausmenetelmiä. Tilajärjestyksellä tarkoitetaan, miten puut ovat sijoittuneet metsässä. Mittausmenetelmiksi valikoituivat puukartta- ja maastomittaus. Tavoitteena oli selvittää mahdolliset erot ja pohtia syitä niille. Tutkimuksessa myös verrataan puukarttoja toisiinsa.

Maastomittaus toteutettiin kesällä 2019 Virtuaalimetsä 2.0 -hankkeen toimesta ja drone kuvaukset myöhemmin elokuussa. Laserkeilausaineisto on peräisin avoimesta lähteestä. Puukartat drone- ja laserkeilausaineistosta valmisti Arbonaut-yhtiö. Maastomittauksesta ja puukartoista laskettiin erinäisiä tilajärjestysindeksejä, joita vertailemalla pystyttiin tarkastelemaan tuloksia. Tilastollisesti data jäi vähäiseksi, joten minkään mittausmenetelmän yleistäminen paremmaksi ei tällä kertaa onnistunut.

Tutkimuksen tulokset osoittautuivat hyvin samankaltaisiksi kaikilla mittausmenetelmillä. Suurin osa mikrokuvioista oli kallellaan satunnaiseen tilajärjestykseen. Suurimmat erot ilmenivät puukarttojen vertailussa, eli miten pisteet (puut) olivat ryhmittyneet toisiinsa nähdessä. Tutkimusta voisi jatkokehittää kuvaamalla lisää mikrokuvioita dronella sekä parantamalla puukarttoja. Tilajärjestys on aiheena ajankohtainen ja kiinnostaa monia.

Kieli
suomi

Sivuja 41
Liitteet 0
Liitesivumäärä 0

Asiasanat

Tilajärjestys, laserkeilaus, drone, puukartta



THESIS
December 2019
Degree Programme in Forestry

Karjalankatu 3
80200 JOENSUU
FINLAND
013 260 600

Author
Sampo Taipale

Title
Comparison of Spatial Distribution Measuring Methods in Stands

Commissioned by
Virtual Forest 2.0

Abstract

The purpose of this thesis was to compare different methods of measuring spatial distribution of trees. Spatial distribution refers to how the trees are located in the forest. Measuring methods for this thesis were field survey and tree map measurement. The aim was to identify possible differences between methods and to consider the reasons for them. Tree maps are also compared in this thesis.

The field survey was carried out in the summer of 2019 by the Virtual Forest 2.0 -project, by drone filming later in the fall. The laser scanning material is from an open source. Tree maps of drone and laser scanning material were made by Arbonaut. Field survey and tree maps were used to calculate various spatial indexes, which were used to compare the results. Statistically, the data remained scarce, so no generalization was possible at this time to choose one measurement method over another.

The results of the study proved to be very similar for all measurement methods. The most of the microplots were tilted to random spatial pattern. The major differences were in the comparison of tree maps, meaning how the points (trees) were grouped relative to each other. The research could be further developed by photographing more microplots with the drone and improving tree maps. The spatial distribution is topical and will certainly be of interest to many.

Language

Finnish

Pages 41

Appendices 0

Pages of Appendices 0

Keywords

Spatial distribution, laser scanning, drone, tree map

SISÄLTÖ

1	Johdanto	5
2	Tilajärjestys	6
2.1	Tilajärjestysindeksit.....	7
2.2	Tilajärjestyksen käyttökohteet.....	8
2.3	Poisson -metsä	10
2.4	Spatiaaliset pisteprosessit	11
3	Kaukokartoitus	11
3.1	Laserkeilaus.....	12
3.2	Ilmakuvaus.....	13
3.3	Drone	14
3.4	Pistepilven muodostus.....	15
3.5	Puukartta	16
4	Tutkimuksen tavoitteet.....	16
5	Tutkimusmenetelmät ja analysointi	17
5.1	Maastomittaus	17
5.2	Laserkeilausaineisto	19
5.3	Fotogrammetria	20
5.4	Dronekuvaukset ja puukarttojen luonti.....	21
5.5	Indeksit ja niiden vertailu	22
6	Tulokset	23
6.1	Mikrokuvioiden tilajärjestys	23
6.2	Tilajärjestyksen jakautuminen Rauansalolla	24
6.3	Drone- ja laserkeilauksella estimoidun puukartan vertailu	26
6.4	Dronen ilmakuva mosaiikkien ja puukartan vertailu	29
7	Pohdinta.....	33
7.1	Tulosten tarkastelu	33
7.2	Luotettavuus	35
7.3	Jatkokehitysmahdollisuudet.....	39
	Lähteet.....	40

1 Johdanto

Puut ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja kilpailevat keskenään resursseista metsässä. Mitä tiheämmin metsässä on puita, sitä tiukemmalla resurssit ovat puuyksilöä kohti. Puiden ryhmittymistä metsässä kutsutaan tilajärjestykseksi, ja se ilmaisee puiden sijaintia toisiinsa nähden. Ihminen pyrkii ymmärtämään tilajärjestyksen mittaamalla metsästä erinäisiä indeksejä tilajärjestykselle maastossa tai sitten kaukokartoituksen avulla. Indeksi luokittelee metsän säännölliseksi, satunnaiseksi tai ryhmittäiseksi, ja tämä auttaa ymmärtämään metsän dynamiikkaa. Tilajärjestyksen hyödynnetään mm. realistisen mallimetsän tuotossa, puiden välisten vuorovaikutusten analysoinnissa, harvennuspoistuman tarkentamisessa ja ajourien suunnittelussa ja sillä voidaan tuottaa lisäluotettavuutta metsäinventointiin.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Virtuaalimetsä 2.0 -hankkeen aineistojen pohjalta, ja osittain yhteistyössä Arbonaut yhtiön kanssa. Kesällä 2019 mitattiin maastomittauksella tilajärjestyksen Rauansalon metsätilalla 52:lta mikrokuviolta, ja myöhemmin elokuussa kuvattiin dronella tarkemmin seitsemää mikrokuviota. Avointa laserkeilausaineistoa sekä hilamuotoista metsävaratietoa hyödynnetään myös tilajärjestyksen selvittämisessä. Arbonaut loi puukartat laserkeilaus- ja droneaineistosta.

Tilajärjestyksen mittaus maastossa on työlästä ja aikaa vievää. Mittaus onnistuu myös puukartoilta, jotka on tuotettu esimerkiksi kaukokartoituksen avulla. Puukartan teko onnistuu helposti nykyteknologialla, mutta sen tarkkuus voi olla kyseenalainen etenkin, jos puukartta perustuu estimaatteihin. Mittausmenetelmän valinta tulisi suorittaa tarkoituksenmukaisesti; heikompi laatuaineistolla ei päästä yhtä tarkkoihin tuloksiin, mitä paremmalla. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on vertailla tilajärjestyksenmittausmenetelmiä sekä niistä saatuja indeksejä.

Vertailun kohteina ovat maastomittaus, laserkeilaus- ja dronemateriaali. Verrataan estimoitua laserkeilaus puukarttaa suhteessa tosiaineistoihin sekä tarkastellaan puukarttojen eroja.

2 Tilajärjestys

Metsä määritellään joukoksi puu-, pensas- pintakasvillisuuslajien ja muiden eliöiden populaatiota, jotka ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa (Kellomäki 2005, 193). Puiden tapauksessa vuorovaikutus on kilpailua keskenään ja huonommin kasvavat ne, joiden kilpailuasema on heikompi. Puut kilpailevat tila- ja kasvutekijöistä. Kilpailuasemaan vaikuttaa puiden sijainti, koko ja naapuripuiden lukumäärä. Puun tarvitsema kasvutila riippuu puulajista sekä puun koosta ja suuret puut, esimerkiksi koivut, tarvitsevat enemmän kasvutilaa. Tosin eri puulajin puut eivät kilpaile yhtä voimakkaasti kuin saman puulajin puut (Miina 2001, 135).

Itseharvenemista metsikössä tapahtuu silloin, kun puuston latvuspeittävyys ylittää 100 % ja itseharvenemisen jälkeen peittävyys säilyy 100 %:ssa. Puut kuolevat myös kasvutekijöiden puutteeseen, jota kilpailu edesauttaa. Luontaisen harvenemisen myötä metsikön puuston lukumäärä vähenee, mutta yksilökoko kasvaa. Kullakin puuston kehitysvaiheella on oma maksimitiheytensä, jonka ylitys johtaa puuston itseharvenemiseen. (Kellomäki 2005, 151 - 154.)

Ihminen pyrkii metsänhoidolla hoitamaan metsää siten, että kullekin puulle jää riittävästi kasvutilaa. Puiden hyvinvointi kulkee käsi kädessä hyvän taloudellisen tuoton kanssa. Metsikön harventaminen lisää puiden kasvutilaa, mikä tarkoittaa lisää resursseja puille (vettä, valoa, lämpöä, ravinteita ja hiilidioksidia). (Kellomäki 1991, 265 - 266.) Parantunut kasvutila tarkoittaa puille nopeampaa paksuuskasvua, elinvoimaisuutta ja vähentää riskiä sairastua kasvitauteihin (Äijälä, Koistinen, Sved, Vanhatalo & Väisänen 2014, 88).

Metsällä on suuri taloudellinen merkitys, ja se tuottaa hyötyä pitkällä aikavälillä. Tälle ajalle tehdään metsäsuunnitelma, jossa on ajoitettu toimenpiteet tuleville

vuosille. Suunniteltaessa metsänhoitoa pitkälle aikajänteelle voidaan tehdä simuloitua ja erilaisia optimointeja, jotta tavoitteet täytyisivät. (Kangas 2001, 223.) Pukkalan (2001) mukaan kiertoaika- ja harvennuslaskelmat tehdään sillä oletuksella, että puusto on homogeenista. Useimmiten metsät ovat heterogeenisempia, kuin oletetaan, ja ne eivät ole yhtenäisiä, sillä esimerkiksi ryhmittäisyyttä saattaa esiintyä. Tästä syystä harvennuspohjapinta-ala jää liian korkeaksi. Metsän tilajärjestyksen tuntemalla voitaisiin vaikuttaa mm. harvennusajankohtaan sekä harvennusvoimakkuuteen, jotta säästyttäisiin turhalta puusto menekiltä.

Tilajärjestys tarkoittaa, miten puut ovat sijoittuneet metsässä. Tilajärjestystä kuvataan erinäisillä matemaattisilla lausekkeilla ja prosesseilla, ja on myös olemassa erilaisia indeksejä tilajärjestykselle. Puut voivat olla sijoittuneet ryhmittäin, satunnaisesti, säännöllisesti tai sitten yhdistelmänä näistä. Esimerkiksi säännöllisessä koivikossa voi olla satunnaisesti kasvavaa kuusi aluskasvustoa. Tilajärjestys ei ole vakio, vaan se muuttuu kiertoajan aikana. Metsänhoidolliset toimenpiteet sekä luontainen puiden kuolleisuus muuttaa puuston tilajärjestystä säännölliseen suuntaan. Tilajärjestysindeksin puolesta voidaan tehdä päätelmiä mm. harvennustarpeen, puiden kasvutilasta suhteessa muihin puihin, puiden välisestä kilpailusta, metsän syntytavasta sekä aiemmista toimenpiteistä. (Pukkala 2007, 156 - 157.)

2.1 Tilajärjestysindeksit

Metsiköissä on maaperän vaihteluita, minkä vuoksi kaikilla puilla ei ole samanarvoiset lähtökohdat hyvään laatukasvuun. Huonot kasvupaikat metsikössä johtavat aukkoisuuteen, kun taas paremmille paikoille tulee ryhmittäisyyttä. Epäsäännöllistä kasvua ja leviämistä aiheuttavat maastossa muun muassa metsikön synnyintapa, muutokset kasvupaikalla, luonnontuhot, kivikot, ajourat sekä ojat. (Pukkala 2001, 157.) Siemenpuumetsiköissä siemenet leviävät siemenpuun välittömään läheisyyteen, minkä seurauksena taimia syntyy vähemmän siemenpuusta pois päin. Tosin suuret ryhmittäiset taimikeskittymät siemenpuun lähellä kilpailevat keskenään, jolloin syntyy aukkoisuutta sekä monet taimista kuolevat. (Miina 2001, 134-135.) Satunnainen tilajärjestys syntyy siemenpuumetsiköistä.

Siemenet eivät voi valita mihin kohtaan ne tippuvat metsässä. Kun hyvät ja huonot kohdat ovat metsässä satunnaisessa järjestyksessä, syntyy satunnainen tilajärjestys. (Pohtila 2001, 50.)

Ryhmittäinen tilajärjestys syntyy usein metsikköön sellaiselle kohdalle, missä on erityisen hyvät kasvuolosuhteet. Pohtilan (2001) mukaan luonnontaimikot syntyvät ryhmittäiseksi ja tilajärjestys voi olla hyvinkin heterogeeninen. Tietysti heterogeenisuus ja ryhmittäisyys muuttuu homogeenisemmaksi ja ryhmittäisyys vähenee ajan myötä näissä taimikoissa.

Säännöllisessä metsikössä tilajärjestys on homogeeninen ja jokaisella puulla on yhtä paljon kasvutilaa. Istutuksella syntyneet metsiköt ovat yleensä säännöllisesti järjestäytyneitä, koska ne ovat säännöllisesti istutettu maahan ihmisen tai koneen toimesta. Säännölliset istutus taimikot muuttuvat tilajärjestyksiltään heterogeenisempaan suuntaan puiden kuoleamisen, ja uusien taimien syntymisen myötä (Pohtila 2001, 51)

2.2 Tilajärjestyksen käyttökohteet

Metsiä käsitellään harvennusmallien mukaan, joiden voimakkuus tulee puuston pohjapinta-alan ja valtapituuden funktiona. Harvennusmallien tavoitteena on pitää puuston latvukset elinvoimaisina ja harvennuspoistumat taloudellisesti kannattavina. (Miina 2001, 136.) Puusto harvennetaan hyvän metsänhoitosuosituksen harvennusmallien mukaan, mutta harvennusmalli ei ota huomioon tilajärjestystä. Tästä syystä metsikön tiheät osat, eli puiden ryhmittäiset sijoittumiset jäävät liian tiheiksi, mikä johtaa kuolleisuuteen ja hitaaseen paksuuskasvuun (Kellomäki 1991, 266). Ryhmittäiset metsiköt ovat latvuksiltaan supistuneempia, kuin mitä säännölliset olisivat (Miina 2001, 136). Ryhmittäisyyden huomiotta jättäminen usein perustellaan aukkoisuuden kompensoinnille, jotta pohjapinta-ala ei menisi liian pieneksi. Näin ollen metsiköt, joissa esiintyy ryhmittäisyyttä, pitäisi harventaa mallien alarajalle mahdollisesta aukkoisuudesta huolimatta.

Tuula Kantola Pro gradu -tutkielmassaan (2010) tutki lahopuun spatiaalista jakautumista Itä-Suomen talousmetsissä. Kantolan mukaan lahopuiden olisi hyvä sijoittaa ryhmittäin muodostaen ns. hotspot alueita, jotka olisivat hyviä luonnonmonimuotoisuuden kannalta. Data tutkimukseen kerättiin maastomittauksella käyttäen kaistainventointia. Tilajärjestyksen kuvaamisessa käytettiin Rippleyn K-funktiota. Tutkimuksen tulokset osoittavat tutkimusalueen lahopuiden olevan ryhmittäisessä tilajärjestyksessä.

Jo taimikkovaiheessa on hyvä olla perillä tilajärjestyksestä. Kylvämällä ja luontaisesti uudistetuissa taimikoissa saattaa taimikossa esiintyä ryhmittäisyyttä, joten aikainen harvennus on suositeltavaa. Ryhmittäinen tilajärjestys taimikossa saattaa tarkoittaa myös täydennysistutusta aukkoisille osille. (Miina 2001, 136.)

Tilajärjestyksellä on vaikutusta metsikön tuotokseen. Maankäytön optimointi liittyy tilanjärjestykseen siten, että kullekin puuyksilölle tulee riittävästi kasvutilaa ja puiden kuolleisuus minimoituu. Ensiharvennuksen myötä puiden tilajärjestys muuttuu säännöllisemmän suuntaan, ja puiden kasvutila optimoituu (Pukkala 1990, 263 - 275). Tilajärjestykselle on viime vuosina tehty tutkimuksia koskien sen soveltuvuutta mm. harvennus tarpeellisuuden määrittämisessä. Pippuri, Kallio, Maltamo, Peltola & Packalen (2012) ovat tutkimuksessaan tutkineet puiden tilajärjestyksen määrittämistä sekä ensiharvennuksen tarpeellisuutta laserkeilauksen avulla. Tutkimuksesta selvisi, että ilmalaserkeilauksella pystytään selvittämään puiden tilajärjestyksiä ja ensiharvennuksen tarpeellisuutta.

Myös metsikön spatiaalisuus kiinnostaa eli tieto puiden tarkoista sijainneista metsässä. Tieto puiden spatiaalisuudesta metsikössä auttaa ajourien suunnittelussa, puiden välisten vuorovaikutusten analysoinnissa ja realistisen mallimetsän tuotossa, ja sillä voidaan tuoda lisää luotettavuutta metsäinventointiin. Ajouria suunniteltaessa urat kannattaa sijoittaa aukkoisten kohtien mukaan, ja tässä metsikön spatiaalisesta tuntemuksesta on hyötyä. (Miina 2001, 135.)

Tilajärjestys vaikuttaa poistumaan ja metsikön kasvuun. Suunnittelussa on olennaista tiedostaa, että tilajärjestyksessä on runsaasti vaihtelua, ja tämä pitäisi ottaa laskennassa huomioon. Mikäli tilajärjestyksiä ei oteta huomioon laskelmissa,

ryhmittäisen metsikön kasvuennuste saattaa olla yliarvio ja säännöllisen taas aliarvio. Harvennuspoistuman kohdalla asia on toisinpäin: ryhmittäisessä aliarvio ja satunnaisessa yliarvio. (Pukkala 2007, 157.)

Oksikkuudella on suuri vaikutus männyn (*Pinus sylvestris*) sahatavaran laatuun. Männylle kasvaa paksuja oksia liian viljavilla mailla sekä harvassa kasvatettuna. (Äijälä, Koistinen, Sved, Vanhatalo & Väisänen 2014, 42.) Männikön tiheydellä on vaikutusta oksikkuuteen (Kellomäki, Lämsä, Oker-Blom & Uusvaara 1988, 5). 1992 Suoritetussa tutkimuksessa Pukkala, Karsikko ja Kolström tutkivat mäntyjen tilajärjestyksen vaikutusta oksikkuuteen. Simuloinnin tulokset osoittavat, että tiheämmällä tilajärjestyksellä on pientä vaikutusta oksikkuuteen. Toisaalta tiheässä kasvatetut männiköt kärsivät heikommasta paksuuskasvusta ja kovemmasta kilpailusta. Mänty myös kasvattaa paksut oksat, jos sille jättää millekään sivulle avointa kasvutilaa. Parhaat kasvutulokset saa, kun suosii tiheämpiä kasvutiheyksiä ja harventaa heikommät yksilöt pois.

2.3 Poisson -metsä

Poissonin-satunnaisjakauma on teoreettinen malli puiden sijoittumiselle metsässä. Siinä jokaisella puulla on yhtä suuri todennäköisyys sijoittua alalle metsässä, ja koko metsä on alueeltaan tasavertainen puun vastaanottamismielessä, puut eivät myös vaikuta toistensa sijoittumiseen. Satunnaisuutensa vuoksi Poisson -metsä kuvaa hyvin metsän luontaista kasvua ja puiden sijoittumista. (Pohtila 2001, 51.)

Miinan (2001) mukaan Poisson -metsä on homogeeninen ja satunnainen tilajärjestyksen malli sekä se sopii todellisen tilajärjestyksen selvittämiseen. Poissonin-jakaumaa hyödynnetään, kun halutaan selvittää mihin tilajärjestys laskennassa saatu indeksi numero sijoittuu. Vertaamalla tulosta Poissonin -indeksiin saadaan selville, onko tilajärjestys satunnainen, ryhmittäinen vai säännöllinen.

2.4 Spatiaaliset pisteprosessit

Tilajärjestystä voidaan myös kuvata spatiaalisilla pisteprosesseilla (engl. spatial point process). Eli puiden sijainnit projisoidaan 2D -tasoon, jossa kullakin puulla on sijainti sekä ne kuvataan pisteinä. Lintuperspektiivi auttaa puiden sijaintien hahmottamisessa, joten sen takia 2D -taso on hyödyllinen. Mikäli puilla on puus-totunnuksia, niin kuviota kutsutaan merkatuksi pistekuvioksi (engl. marked point pattern). (Miina 2001, 137.)

Itse pisteprosessi kuvio ei kerro vielä tilajärjestyksestä mitään. Vertaamalla luotua pisteprosessia poisson-metsän tuottamaan spatiaaliseen pisteprosessiin, voidaan tehdä päätelmiä tilajärjestyksestä. Poisson -metsän satunnaisuus tunnetaan hyvin, joten laskemalla tunnuslukuja pisteprosessista ja vertaamalla niitä poissoniin, saadaan tietoa tilajärjestyksestä kuviolla. Erilaisia indeksejä on mm. Hopkinsin indeksi, Clarkin ja Evansin indeksi, Rippleyn K -funktio, Fisherin indeksi ja Greig-Smithin vierekkäisten neliöiden menetelmä. (Miina 2001, 138, 143 – 146.)

3 Kaukokartoitus

Metsävaratiedon inventointi ja mittaus on tehty perinteisesti maastotyönä. Digitalisaation myötä 1990-luvulla siirryttiin digitaalisiin kartta-aineistoon ja ilmakuviin, satelliittikuvia alettiin hyödyntämään operatiivisesti sekä paikkatietojärjestelmät otettiin käyttöön. Tekniikan kehittymisen myötä siirryttiin maastomittauksesta enemmän kaukokartoituksen puoleen, joka perustuu kohteesta heijastuvan sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen. Tosin maastomittaus on edelleen kaukokartoituksen rinnalla, vaikkakin pienemmässä roolissa lähinnä tulkinnan helpottamiseksi, oikeellisuuden tarkistamiseksi ja kalibroinnin vuoksi. Kaukokartoitus on tiedon hankkimista olematta kosketuksissa itse kohteeseen, josta tietoja halutaan. (Tokola, Hyppänen, Miina, Vesa & Anttila 1998, 1 - 3.)

Kaukokartoitus voi olla aktiivista tai passiivista. Ensimmäiseksi mainittu lähettää säteilyä kohteeseen, jonka vastakaiusta saadaan kohteen data. Passiivinen taas tunnistaa kohteiden säteilemää valoa, josta saadaan data. Esimerkkinä aktiivisesta on laserkeilaus ja passiivisesta taas ilmakuvaus. (Nasa 2019.) Kaukokartoitusta on mahdollista tehdä eri mittakaavoissa, esimerkiksi yksittäisten puiden, tietyn kokoisten koealojen, kuvioiden tai metsätilojen kokoisina. Kaukokartoitus tuo ajankohtaista informaatiota metsäsuunnitteluun, ja se on paljon tehokkaampaa kuin perinteinen maastomittaus. (Holopainen, Hyyppä, & Vastaranta 2013, 7.)

3.1 Laserkeilaus

Metsiä koskevaa tietoa kerätään Suomessa kaukokartoituksen avulla, ja yksi kaukokartoituksen menetelmistä on laserkeilaus. Suomi on muutaman vuoden sisällä laserkeilattu kokonaan. Hyötynä laserkeilauksessa on ajantasainen metsävaratieto, tiedon keruun helppous sekä kustannustehokkuus, tarkkuus ja riippumattomuus auringosta, koska laserkeilaus ei tarvitse sähkömagneettista säteilyä. (Holopainen, Hyyppä, & Vastaranta 2013, 7.)

Laserkeilaus eli laser scanning (LS), tarkoittaa kaukokartoitus menetelmää, jota käytetään pintamuotojen ja kasvillisuuden mallintamiseen. Laserkeilaus tuottaa kohteesta kolmiulotteisen mallin eli pistepilven. Sen idea on seuraavanlainen: laserista lähetetään laserpulsseja kohteeseen, josta voidaan mitata niiden etäisyys kohteeseen kulkuajan perusteella. Korkeuden määrittäminen edellyttää laserin paikan sekä asennon määrittämistä, ja pulssien lähetys tulee tapahtua kohtisuoraan lentosuuntaa vastaan. Lasertutkan sijainti ja asento voidaan määrittää inertiajärjestelmillä sekä GPS-mittauksilla. (Holopainen ym. 2013, 12.)

Laserkeilaus voi tapahtua joko maastossa tai ilmasta. Molemmissa tyyleissä on omat ominaisuutensa, kuten ilmasta mitattuna puuston korkeus painottuu ja maastossa taas leveys eli horisontaalinen dimensio. Lentolaserkeilauksessa on kaksi puustontulkinta menetelmää: yksinpuintulkinta (engl. Individual tree detec-

tion - ITD.) ja aluepohjainen menetelmä (engl. Area based approach - ABA.). Menetelmä riippuu laserin pulssitiheydestä. Tiheimmällä pulssilla voidaan tehdä yksinpuintulkinta ja harvemmalla aluepohjainen menetelmä. Puustotiedot tuotetaan arvioimalla fysikaalisia ominaisuuksia pistepilvestä tai sitten vertaamalla tilastollisia riippuvuuksia ennustettujen ja pistepilvestä laskettujen tunnusten osalta. (Holopainen ym. 2013, 21, 30.)

Yksittäisten puiden etsinnässä auttaa lokaalien maksimien etsiminen, kuten metsäisessä tapauksessa puiden latvojen, koska ne ovat korkeimpia kohtia eli lokaaleja maksimeja. Ne etsitään puuston pintamallista (CHM) käytettäessä keilauksen tuloksena syntynyttä laserpistepilveä. Pintamalli tosin edellyttää suodatusta ennen lokaalien maksimien etsintää, koska muuten pistepilvestä saattaa tulla virheellisiä tulkintoja. Esimerkiksi suuret oksat saatetaan lukea latvuksiksi. Tarkkuuteen vaikuttaa pulssitiheys, mutta riittävän tarkalla aineistolla saadaan tunnistamisen lisäksi tietoon puiden pituudet ja sijainnit. (Holopainen ym. 2013, 28.)

3.2 Ilmakuvaus

Ilmakuvaus tarkoittaa sähkömagneettista säteilyä eli auringonvaloa hyödyntävää kaukokartoitusmenetelmää. Kuvat otetaan yleensä lentokoneesta tai dronesta, jonka mukaan määräytyy lentokorkeus kuvan otolle. Lentokoneiden lentokorkeus vaihtelee 1 000 m:stä – 9 000 m:iin ja droneilla korkeus voi Suomessa olla maksimissaan 150 m. (Pukkala 1988, 46 - 48.)

Ilmakuvia on perinteisesti käytetty metsätaloudessa ennakkokuvioinnin aikaansaamiseksi. Ilmakuvat edellyttävät näin ollen kuvantulkintaa, jotta niistä voidaan erottaa haluttuja piirteitä tai tunnuksia. Paremman tarkkuuden vuoksi referenssi koealat maastosta auttavat kuvan tulkinnassa. Ilmakuvauksella ei ole päästy yhtä tarkkoihin mittauksiksi kuin maastomittauksessa, joten sen rooli metsätaloudessa on lähinnä suuntaa antava. (Tokola, Hyppänen, Miina, Vesa & Anttila 1998, 25 – 26.)

Pienemmässä mittakaavassa ilmakuvista on hyötyä eli metsikkö- tai puustototalla. Latvuksen pinta-ala tai läpimitta voidaan määrittää kuvista mittaamalla tai arvioimalla. Tosin itse latvuksen dimensiot eivät ole pääasiana, vaan siitä johdettavat muut tunnuksat. Puun pituus ja rinnankorkeusläpimitta saadaan ennustamalla, joista voidaan sitten laskea tärkein tieto eli puun tilavuus. (Tokola ym. 1998, 25 - 26.) Ilmakuvat eivät itsessään ole karttaa vastaavia kuvia, ennen kuin ne on korjattu korkeusmallilla sekä oikaistu karttaprojektioon. Tämän jälkeistä tulosta kutsutaan ortokuvaksi, josta voi mitata etäisyyksiä ja pinta-aloja luotettavasti. (Innocad 2019.)

Ilmakuvat voidaan ottaa pituus- ja/tai sivupeitolla. Peitto tarkoittaa, että kuvat peittävät toisiaan pituus- ja/tai sivusuunnassa x % määrän, eli niillä sama alue esiintyy eri kuvissa. Kun kuvat on otettu tällä tavalla päällekkäin, voidaan ne mosaiikoida eli asettaa vieritysten sijaintinsa mukaan. Kuvissa saattaa esiintyä esimerkiksi sama puu kahdessa kuvassa, joten ohjelmistot yhdistävät nämä samat piirteet kuvista. Näin saadaan ilmakuvamosaiikki, jossa värit ja valoisuus on tasapainotettu. (Haggrén 2002, 1 - 2.)

Fotogrammetria on mittausmenetelmä kuville ja sillä pystytään myös mallintamaan kolmiulotteisesti kohteita. Menetelmä perustuu siihen, että kuvattavan kohteen pisteet ovat havaittavissa useimmilta kuville. (Ahmad, Uddin & Goparaju 2018, 224 – 226.) Ohjelmat kuten Agisoft tekevät pistepilven kuvista ja jokaisella pisteellä on x-, y- ja z koordinaatit. Kuten laserkeilauksessakin, tällä menetelmällä pystytään estimoimaan esimerkiksi puiden latvuuksia ja muita puustotunnuksia.

3.3 Drone

Dronet ovat miehittämättömiä ohjattavia ilma-aluksia. Droneja on käytetty jo useita vuosi sotilaallisiin tarkoituksiin, pelastustehtäviin, valvontaan ja sään ennustamiseen. Dronet ovat varustettuna erilaisilla kameroilla, mikä tuokin uusia mahdollisuuksia kuvata asioita eri kuvakulmista. Dronella pystytään tuottamaan ilmakuvia ja sitten fotogrammisilla ohjelmistoilla niistä pystytään laskemaan pistepilviä ja ortokuvia. Tavalliselle kansalaisellekaan droneen investoiminen ei ole

kova sijoitus, sillä ne eivät maksa halvimmillaan muutamaa sataa euroa enempää. (Winther 2019.) Drone onkin hyvä vaihtoehto kartoitukselle, kun alue on liian pieni perinteiselle ilmakuvaukselle, mutta liian työläs maastotyölle.

DJI on hintalaatu suhteeltaan hyvä drone valmistaja ja pienimmätkin dronet talentavat 12 megapikselin jpeg-kuvia ja 4k-videoita. Suomessa on myös melko vapaamielinen lainsäädäntö dronejen lennätysten osalta, kunhan noudattaa sää-döksiä, esimerkiksi ei lennätä kielletyillä alueilla, ei yli 150 metrin korkeudessa, ei saa häiritä yksityisyyttä ja välttää asutusta. (Droneinfo 2019.)

3.4 Pistepilven muodostus

Pisteitä syntyy, kun lasersäde mittaa lukuisia pisteitä osuessaan kohteeseen, koska pisteitä on paljon, kutsutaan tätä kokonaisuutta pistepilvitietoksi. Pistepilvi on yksi esitystapa tälle tiedolle ja se on numeerista tietoa kohteesta, jossa jokaisella pisteellä on oma x- y- ja z koordinaatti. (Prodigious 2019). Myös fotogrammetrialla pystytään luomaan pistepilvi esimerkiksi ilmakuvien avulla (Geocenter 2017.) Fotogrammetrian pistepilvi perustuu kuvien päällekkäisyyteen, jotta samaa kohdetta, esim. puuta, on kuvattu useasta eri sijainnista, jotta kyseinen puu voidaan mallintaa kolmiulotteisesti.

Pistepilvestä voidaan jaotella erikseen eri pintamalleja, joita voi käyttää tarkoituksenmukaisesti. Pintamalleja on maanpinnan maastomalli (engl. Digital terrain model - DTM), Pintamalli (engl. Digital surface model - DSM) ja puuston pituusmalli (engl. Canopy height model - CHM). (Holopainen, Hyyppä, & Vastaranta 2013, 13.) Pistetiheys vaikuttaa pistepilven ominaisuuksiin ja tarkkuuteen, sillä mitä tiheämmässä pisteitä on, sen yksityiskohtaisempaa tietoa pilvi sisältää. Laserkeilauksessa tarkkuutta voi lisätä kuvausresoluutiota kasvattamalla tai kuvaamalla kohdetta lähempää. Fotogrammetriassa taas lisäämällä valokuva-aineiston pikseli tiheyttä. (Savisaari 2017, 33.)

3.5 Puukartta

Nykyisin on mahdollista projisoida suuria määrä tietoa pieneen tasoon, jotta sitä voi tarkastella helposti muun muassa tietokoneen näytöltä. Tällaista menetelmää kutsutaan puukartaksi (treemap), ja sitä käytetään hierarkkisen tiedon visualisoinniseksi 2D-tasossa. Hyötynä puukartoissa on hyvä luettavuus ja pieni sivusuhte. (Ahomaa 2001, 10.)

Puukartta voidaan luoda laserkeilausaineiston tai/ja ilmakuvien pohjalta, mutta edellytyksenä on, että puiden koordinaatit tunnetaan, jotta ne voidaan laittaa kartalle oikeaan paikkaan. Puiden sijainnin määrittämiseen on useampia tapoja, mutta yleisimpiä ovat fotogrammetrinen menetelmä, ja laserkeilauksen tuottaman pistepilven lokaalien maksimien hyväksikäyttö. Puukartat sisältävät myös puulajin ja tarjoavat uuden tavan mitata koaloja suoraan kartalta sekä nähdä metsikön tilajärjestystä lintu perspektiivistä. Puukarttaa voi myös päivittää ajan tasalle kaukokartoituksen avulla. (Holopainen, Vastaranta & Hyyppä 2009, 230, 232.)

4 Tutkimuksen tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa tilajärjestysindeksit maastomittauksen ja puukarttojen avulla mikrokuvio kohtaisesti. Näitä tuotettuja indeksejä verrataan toisiinsa sekä tarkastellaan estimoidun laserkeilausaineiston tarkkuutta suhteessa tosiaineistoon. Tutkitaan myös puukarttojen eroja toisiinsa, eli miten pisteet ovat sijoittuneet ja ovatko ne määrällisesti eroavia. Vertailevassa tutkimuksessa vertailun kohteina ovat erilaiset tapaukset, prosessit tai tapaukset, jotka on todettu jollakin tapaa yhteismitallisiksi ja täten vertailukelpoisiksi (Koppa 2019). Vertailun tarkoituksena on selvittää mahdolliset eroavuudet tuloksista sekä pohtia syitä niille.

Toisena tavoitteena oli tutkia, kuinka maastomittauksella voidaan tuottaa luotettavaa dataa sekä mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Jos maastomittausdata osoitetaan tarkaksi, niin se antaa lisää luotettavuutta T-square -menetelmälle. Myös Virtuaalimetsä 2.0:lle tuotettu data on silloin aiempaa luotettavammalla pohjalla.

5 Tutkimusmenetelmät ja analysointi

Tutkimusmenetelmänä oli määrällinen eli kvantitatiivinen tutkimus. Määrällisessä tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita mm. syy- ja seuraussuhteista, luokitteluista ja vertailuista. Tyypillistä sille on, että se sisältää runsaasti tilastollisia ja laskennallisia analyysimenetelmiä. (Koppa 2019.)

Mikrokuvio-otanta tehtiin Joensuun kaupungin omistamasta Rauansalon tilalta ja 500 mikrokuvioista 52 valikoitui mitattaviksi maastossa. Ehtona valikoitumiselle oli, että mikrokuvion puusto olisi kehitysluokaltaan vähintään O2-kehitysluokkaa. Otoksesta tämän opinnäytetyön vertailuun käytetään 7:ää mikrokuvioita, koska dronella kuvattua materiaalia ei ole enempää. Seitsemän valittua mikrokuvioita edustavat suhteellisen kattavasti kuusi- ja mäntymetsikköjä eri kehitysluokissa (O2 - O4). Tarkoituksena on verrata kolmea eri tilajärjestyksen mittaamenetelmää näihin valittuihin mikrokuvioihin.

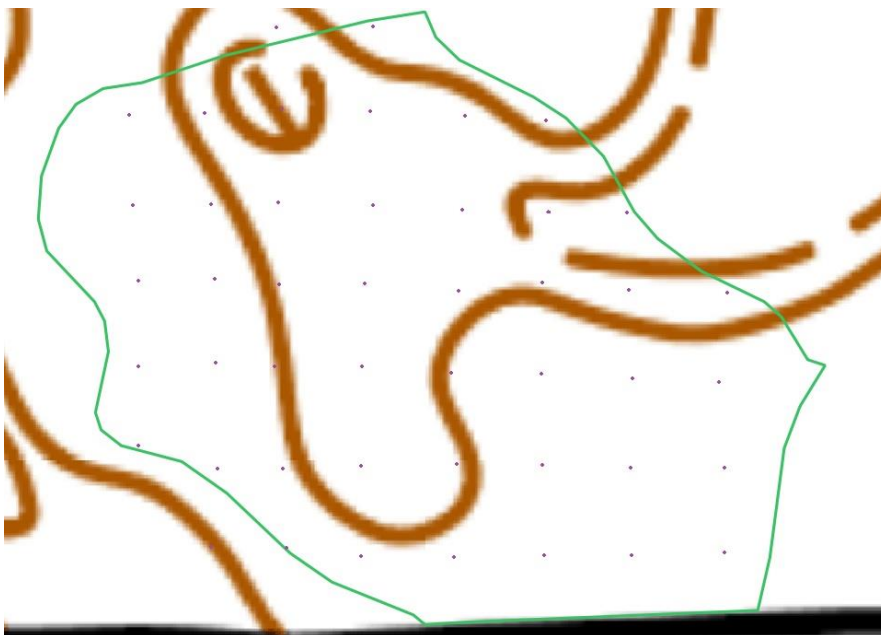
5.1 Maastomittaus

Tilajärjestyksen maastomittaus on toistaiseksi vähäistä metsätaloudessa, sen heikon kannattavuuden vuoksi. Laserkeilauksen myötä tämä saattaa muuttua (Pukkala 2007, 157). Tilajärjestyksen mittaaminen on työlästä maastotyönä, jonka vuoksi sitä ei ole hyödynnetty metsää kuvaavissa malleissa (Miina 2001, 134.)

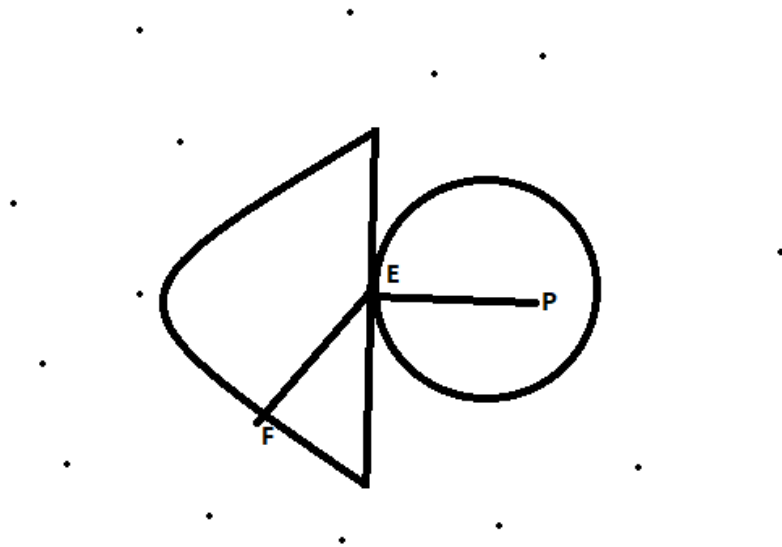
On mahdollista mitata metsästä tilajärjestysindeksi ja käyttää sitä korjaamaan harvennus- ja kasvuarvioita. Tällaisen indeksin saisi relaskoopikoeloen pohjapinta-alojen vaihtelusta. Indeksia käytetään ennustamaan kasvu- ja harvennuspoistuman vaihtelua kuviolla. Menetelmä olisi hyvä, koska kuviolta otetaan tavanomaisesti runkoluku tai pohjapinta-ala, mutta jos siitä johdetaan vielä tilajärjestysindeksi, niin täytyisi koealat sijoittaa objektiivisemmin. (Pukkala 2007, 157.)

Mikrokuviot, jotka valikoituivat otannasta, mitattiin kesällä 2019 Virtuaalimetsä 2.0 -hankkeen toimesta. Samoja kuvioita käytetään myös hankkeen toiminnassa. Mikrokuviointi tehtiin alueelle, jotta saataisiin homogeenisempia metsiköitä mittauksen kohteeksi. Koealojen määrä mikrokuvioilla riippui kuvion koosta.

Maastomittaus suoritettiin käyttämällä T-square-otantaa (kuva 1). T-square otannassa pisteitä on 20 metrin välein, ja mittaus aloitetaan ottamalla satunnaisluku kuvion rajalta. Jokaisella mittauspisteellä suoritetaan T-squaren mukainen mittaus (kuva 2). Eli mitattiin etäisyys mittaajasta lähimpään puuhun ja siitä vielä etäisyys seuraavaan lähimpään puuhun. Alle 5 cm:in paksuisia puita ei huomioitu mittauksessa. (Pippuri, Kallio, Maltamo, Peltola & Packalen 2012, 307.)



Kuva 1. T-square otanta. Kuvassa mikrokuvio, jossa pisteillä merkattu esimerkiksi, että miten mittauspaikat sijoittuisivat.



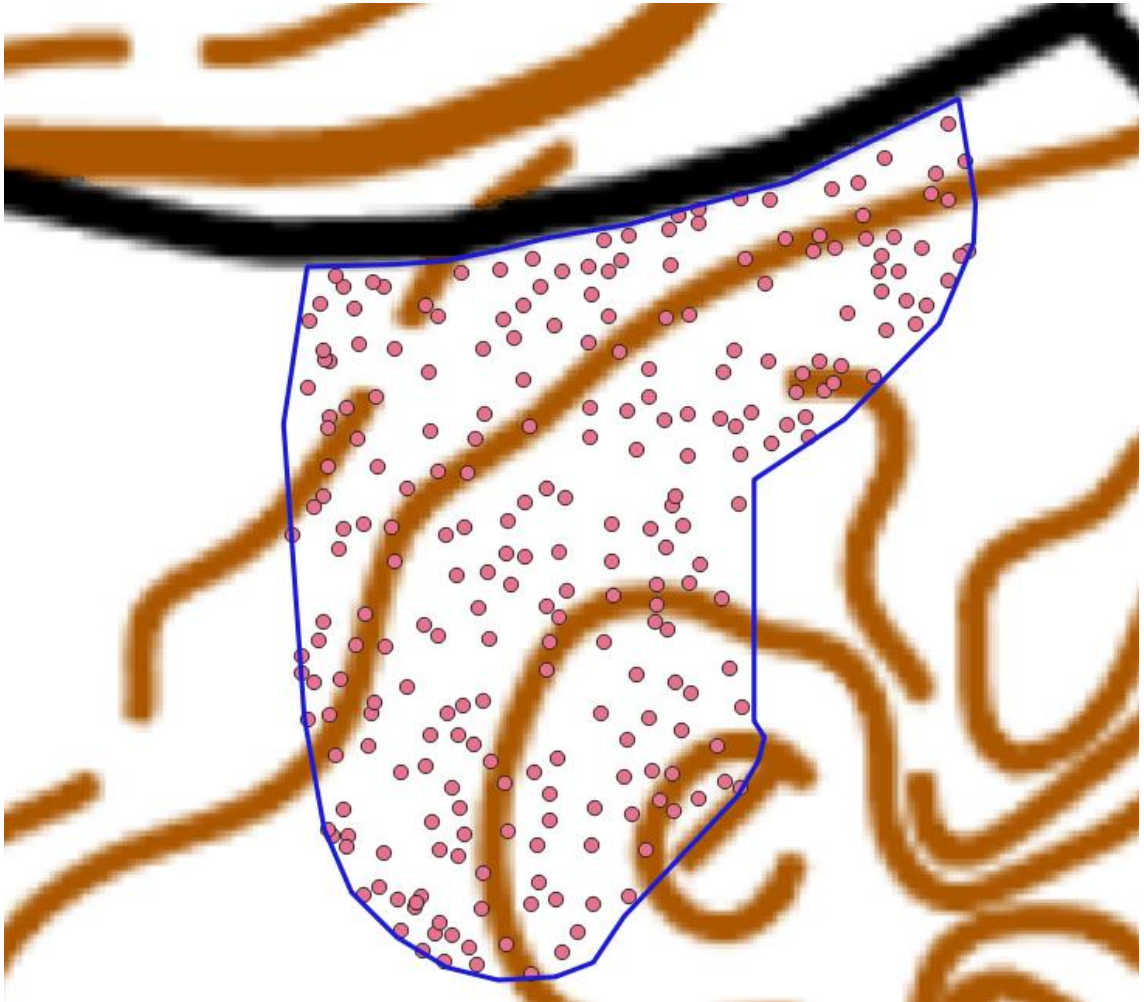
Kuva 2 T-squaren mittaustapa. Kuvassa P=mittaaja, E=lähin puu ja F=lähimmän puun lähin puu.

T-square-otanta on validi tilajärjestyksen mittausmenetelmä. Menetelmällä saadaan tilastollisesti kattavaa dataa kuvion tilajärjestysjakaumasta, koska T-square perustuu pisteestä pisteeseen tehtäviin mittauksiin, ja pisteet levitetään systemaattisesti kuviolle. Objektiivisuutta menetelmälle tuo mikrokuviolle mentäessä satunnaistettu luku, minkä jälkeen käytetään samaa etäisyyttä koalojen välissä (kuva 2). (Besag & Cleaves 1973, Pippuri ym. 2012, 307 mukaan.)

5.2 Laserkeilausaineisto

Avoimesta laserkeilausaineistosta sekä hilamuotoisesta metsävaratiedosta Arbonaut teetti puukartan, joka toimii toisena tilajärjestysmittauksen lähteenä. Puulista muodostettiin estimoimalla teoreettinen jakauma metsävaratiedon keskitunusten perusteella parametrien palautusmenetelmällä (parameter recovery) ja poimimalla siitä yksittäiset puut (ABA grid -menetelmä). Laserpistepilveä analysoidaan lokaalien maksimien etsimiseksi ja alueen tarkastelemiseksi. Puulistan puut tarkasteltiin yksitellen lokaalien maksimien perusteella, jotta kunkin puun mahdollinen sijainti olisi mahdollisimman tarkka. Jokaiselle puulistan puulle ei

löytynyt yksiselitteistä sijaintia, vaan ne sijoitettiin pistepilven perusteella sinne, missä ne voisivat sijaita. Itse menetelmä on vielä kehitysvaiheessa ja käyttää Arbonautin omaa C++ -koodia. (Peuhkurinen 2019.) Puukartat ovat shape -tiedostoina, joka on vektoripohjainen formaatti paikkatietojärjestelmille luettavaksi. Puukartat ovat pistemuotoista vektoridataa, jonka ominaisuuksissa on sijainnin lisäksi pituus ja läpimitta (kuva 3).



Kuva 3. Kuvio 367, kuvasta näkyy puiden sijainnit pisteinä mikrokuviolla.

5.3 Fotogrammetria

Drone ottamia ilmakuvia käsiteltiin fotogrammetrisin menetelmin, jotta niistä voitaisiin myöhemmin luoda puukartta. Kuvista tehtiin mosaiikki ja kuviolle tehtiin korkeusmalli. Karelia-ammattikorkeakoululla on lisenssi Airsoft Photoscan sovellukseen, joten kuvienkäsittely suoritettiin koululla.

Sovelluksella käytiin läpi jokainen kuva ja etsittiin yhteisiä pisteitä näille. Tämä tehtiin kolmiulotteisen mallin (pistepilven) aikaansaamiseksi. Tuotetut mallit lähetettiin eteenpäin Arbonautille puukarttojen luontia varten.

5.4 Dronekuvaukset ja puukarttojen luonti

Maastossa suoritettiin myös valikoiduilla mikrokuviolla dronekuvaukset. Ne suoritettiin Karelia-ammattikorkeakoulun DJI Mavic Prolla, jonka kuvauskorkeus oli 118,9 metriä, ja kuvat otettiin 80 % sivupeitolla (kuva 4). Dronessa oli heikko akunkesto, joka yhdistettynä kiireeseen johti vain 7. mikrokuvioidun kuvaukseen. Kolmas tilajärjestyksen mittausta suoritettiin puukartoilta, joka johdettiin drone DJI Mavic Pro:n ottamista ilmakuvista.



Kuva 4. DJI Mavic Prolla otettu ilmakekuva 118,9 metrin korkeudesta. Kuvasta pystyy erottamaan puulajin, puiden latvuksia ja metsätien.

Droneaineistosta tehtiin puukartat yksinpuintulkinnalla. Pistepilvestä on tehty Canopy height model (CHM), joka on polygonoitu siten, että polygoni vastaa yhtä puunlatvusta. Puukartat tehtiin Arbonautin ArboLIDAR ohjelmistolla. (Peuhkuri-

nen 2019.) Samankaltaista latvusten erottelu menetelmää on Peuhkurisen mukaan käytetty laserkeilauksen osalta tutkimuksessa "Individual Tree Crown Delineation from Airborne Laser Scanning for Diseased Larch Forest Stands" (2017). Valitettavasti kolmen mikrokuvion pistepilvestä (255, 285 ja 286) ei saatu tehtyä toimivaa puukarttaa.

5.5 Indeksit ja niiden vertailu

Viitaten Besagin ja Cleavesin (1978) t_n -indeksiin, Pippuri, Kallio, Maltamo, Peltola, & Packalen (2012, 307) toteavat sen kuvaavan parhaiten tilajärjestystä T-square otannan tapauksessa (kaava 1). t_n -Indeksin arvo ilmaisee puuston tilajärjestystä, jos arvo on lähellä 0.5 on puusto satunnainen eli lähellä poisson-metsää. Arvo lähempänä nollaa tarkoittaa säännöllistä ja yksi taas ryhmittäistä.

Kaava 1. t_n -Indeksin laskukaava.

$$t_n = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 (x_i^2 + 0,5z_i^2)^{-1},$$

n =Koealojen määrä

x =Lähin puu mittauspisteestä

z =Lähin puu koepuusta

Lähde: Pippuri, Kallio, Maltamo, Peltola, & Packalen (2012, 307)

Puukartoille laskettiin indeksi QGIS-ohjelman lähimmän naapurin menetelmällä. Menetelmä mittaa vektori tason pisteiden väliset etäisyydet ja tuottaa indeksin, josta voidaan ryhmitellä metsikkö tiettyyn tilajärjestykseen. Jos indeksi on 0, niin tilajärjestys on ryhmittäinen, 1 tarkoittaa satunnaista ja 2.15 taas säännöllistä. (IB Geography 2011.)

Indeksejä vertaamalla voidaan tutkia tulosten yhdenmukaisuutta. Vaikka indekseen tulkinnat eroavat voidaan niiden tarkkuutta havainnoida tulkinnan perusteella. Esimerkiksi desimaaliluku on täysin eri, satunnainen tulkinta luvulle pysyy samana indeksi kohtaisesti. Näin ollen voidaan päätellä, että molemmat mittausmenetelmät ovat oikeassa todennäköisesti.

6 Tulokset

Opinnäytetyötä varten mitattiin tilajärjestystä kolmella eri tavalla Rauansalon alueelta. Dronemateriaali jäi suppeaksi, joten tulosten yleistettävyyttä tilastollisin menetelmin ei onnistunut tällä datalla. Tosin datan perusteella voidaan tehdä pinta-puolisia päätelmiä menetelmien eroista.

Tulokset valituille 7 mikrokuviolle käydään ensin kokonaisuudessaan, minkä jälkeen tarkastellaan muiden 45 mikrokuvioiden poikkeamia satunnaisesta t_n -indeksistä. Näitä poikkeavia tilajärjestyksiä tarkastellaan laserkeilaus puukarttojen näkökulmasta, että onko kartoissa huomattavissa yhtäläisyyksiä maastomittauksen osoittamaan tilajärjestysindeksiin. Puukarttoja verrataan seuraavassa osiossa, keskittyen lähinnä pisteiden sijoitteluun ja määrään. On myös laskettu kahdessa dronella kuvatussa kuviossa mekaanisesti puiden latvukset mosaiikeista, jotta voitaisiin arvioida latvustunnistuksessa käytetyn algoritmin oikeellisuutta sekä kuvien laatua.

6.1 Mikrokuvioiden tilajärjestys

Taulukossa 1 on yhteenveto valittujen mikrokuvioiden tilajärjestysindekseistä kolmella eri mittausmenetelmällä. Dronen tuottamista pistepilvistä kolmessa oli ongelmia, joten niistä ei valitettavasti saatu tuotettua puukarttoja. Ilman puukarttoja indeksit kuviolle 255, 285 ja 286 jäivät laskematta dronen osalta.

Taulukko 1. Tilajärjestysindeksit valituille mikrokuviolle eri mittausmenetelmillä.

Mikrokuvio	Maastomittaus	Laserkeilaus	Drone
255	<u>0.518476</u> , eli satunnainen	<u>1.007595</u> , eli satunnainen	x
285	<u>0.506679</u> , eli satunnainen	<u>0.978915</u> , eli satunnainen	x
286	<u>0.465790</u> , eli satunnainen	<u>1.020853</u> , eli satunnainen	x
367	<u>0.491483</u> , eli satunnainen	<u>0.989954</u> , eli satunnainen	<u>1.216299</u> , eli satunnainen

398	<u>0.524736</u> , eli satunnainen	<u>0.855165</u> , eli satunnainen	<u>1.024509</u> , eli satunnainen
444	<u>0.576375</u> , eli satunnainen	<u>0.892716</u> , eli satunnainen	<u>0.943731</u> , eli satunnainen
456	<u>0.565965</u> , eli satunnainen	<u>0.890049</u> , eli satunnainen	<u>1.00906</u> , eli satunnainen

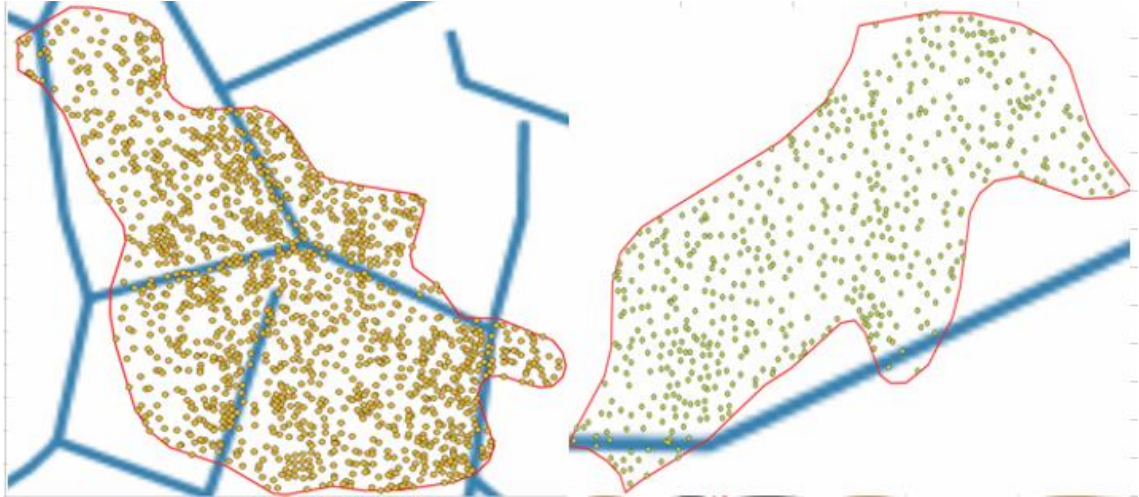
Taulukko 2. Tilajärjestysindeksien tulkinnat.

T_n-indeksi	Lähimmän naapurin indeksi
0=säännöllinen	0=ryhmittäinen
0.5=satunnainen	1=satunnainen
1=ryhmittäinen	2.15=säännöllinen

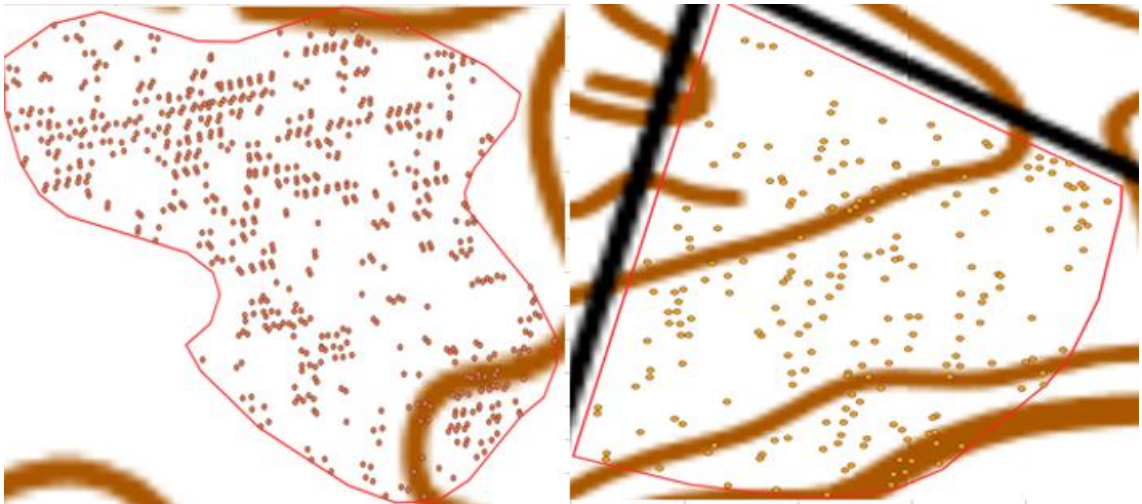
Maastomittauksen tulokset ovat t_n -indeksin muodossa, ja drone- sekä laserkeilauksella tuotettujen puukarttojen indeksit ovat lähimmän naapurin indeksejä. Indeksien tulkinnat näkyvät yllä taulukossa 2. Näiden mikrokuvioiden tilajärjestysindeksit olivat satunnaisia kaikilla mittausmenetelmillä, mutta datan vähäisyyden vuoksi ei pystytä yleistämään yhtä mittausmenetelmää toista tarkemmaksi. Muutamia kymmenes osa desimaalin eroja on havaittavissa mm. kuviossa 367, 398, 444 ja 456. Tosin tämä kymmenes osien ero satunnaisuuden indeksistä ei riitä saamaan indeksiä edes kallelleen toista tilajärjestystä.

6.2 Tilajärjestyksen jakautuminen Rauansalolla

Laskettiin muille 45 mikrokuviolle t_n -indeksi, jotta voitaisiin verrata mahdollisia ryhmittäisiä tai säännöllisiä tilajärjestyksiä laserkeilauksella tuotettuihin puukarttoihin. On myös hyvä saada näkökulmaa siitä miltä eri tilajärjestykset näyttäisivät puukarttana (kuvat 5 - 6). Neljässä mikrokuviossa t_n -indeksi viittasi ryhmittäiseen tilajärjestykseen, mutta lähimmän naapurin indeksi puolestaan viittasi satunnaiseen tilajärjestykseen. Kaikki 4 kuviota paitsi 304 olivat kehitysluokiltaan 02-03 kehitysluokkaa, kun taas 304 oli 04-kehitysluokkaa. Suurin poikkeama oli kuviossa 192 molempien indeksien puolesta (taulukko 3).



Kuva 5. Mikrokuviot 72 & 94 ja laserkeilauksella estimoidut puukartat.



Kuva 6. Mikrokuviot 192 & 304 ja laserkeilauksella estimoidut puukartat.

Taulukko 3. Ryhmittäiset tilajärjestykset mikrokuvio otannassa.

Mikrokuvio	Tn-indeksi	Lähimmän naapurin indeksi
72	<u>0.75070157</u> , eli ryhmittäinen	<u>0.751043</u> , eli satunnainen
94	<u>0.77527743</u> , eli ryhmittäinen	<u>0.873691</u> , eli satunnainen
192	<u>0.84129723</u> , eli ryhmittäinen	<u>0.628339</u> , eli satunnainen
304	<u>0.77712768</u> , eli ryhmittäinen	<u>0.851232</u> , eli satunnainen



Kuva 7. Maastokuva kuviolta 192.

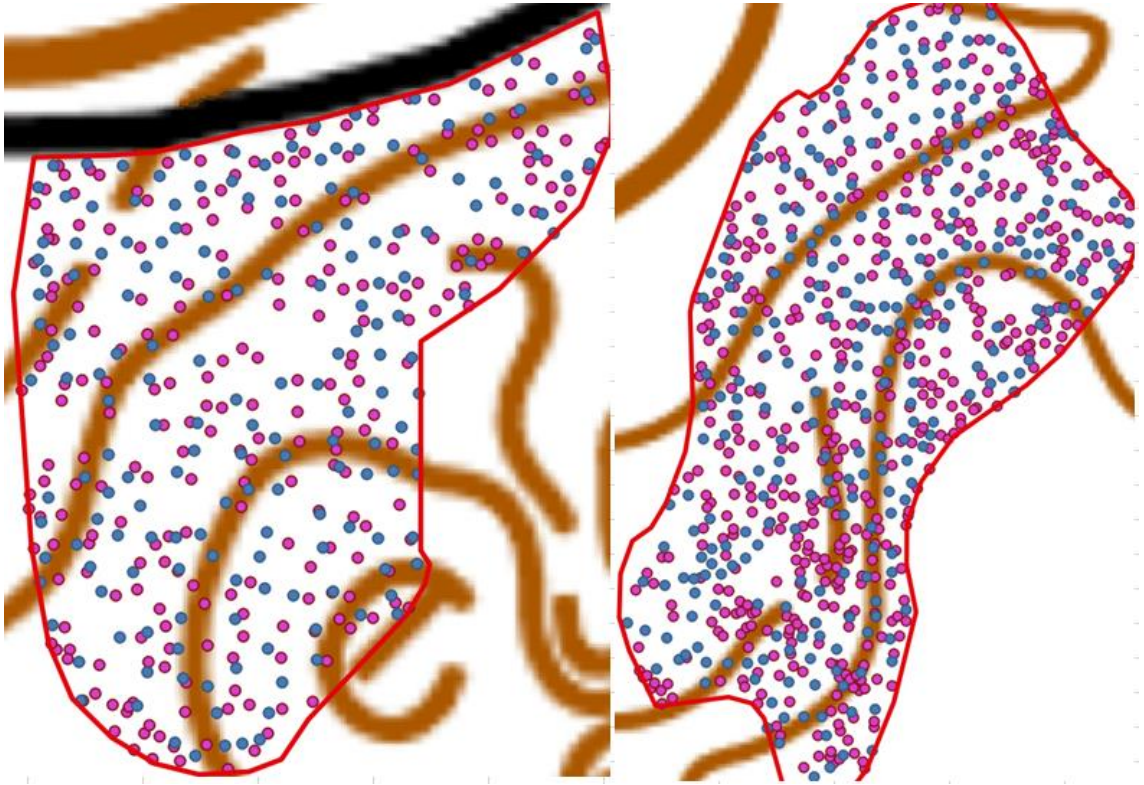
Kuviossa näkyy merkkejä ryhmittäisyydestä paikoitellen (kuvat 5 - 6). Etenkin kuvion 192 puukartassa näkyy ryhmittäisyyttä sen yläosassa. Kuvion 192 maastokuvan perusteella (kuva 7) on kuviolla harventamatonta metsää runsaasti, josta johtuvat tiiviit puuryhmät. Vaikka T-square -mittauksessa ei ole huomioitu alle 5 cm:n paksuisia puita, on mittauksiin päässyt silti mukaan moni tiheämpi osa metsikössä.

6.3 Drone- ja laserkeilauksella estimoidun puukartan vertailu

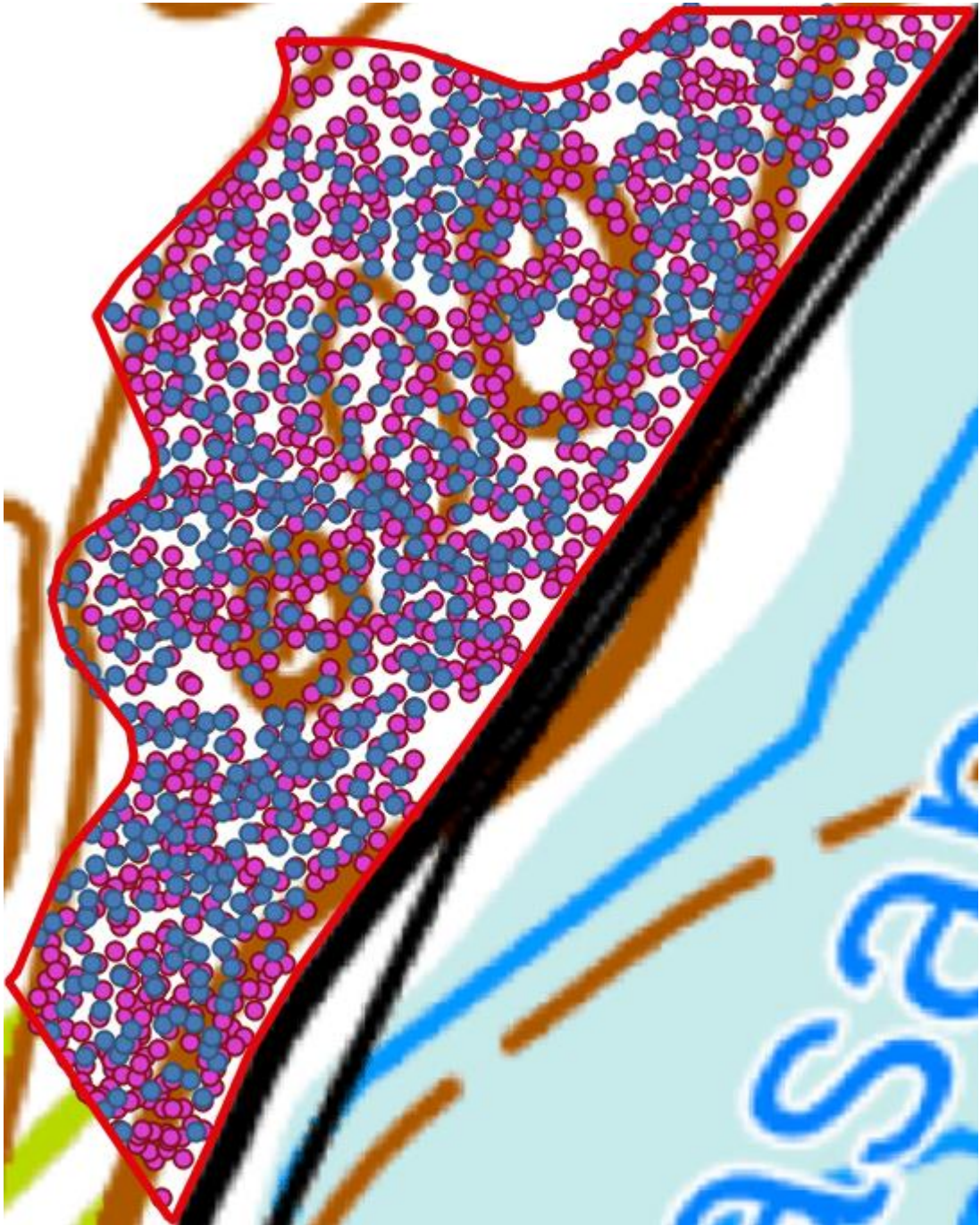
Puukartoja vertaillessa ilmeni eroja pisteiden (puiden) lukumäärän ja niiden sijoittumisen välillä. Puukartoista näkee pisteiden sijoittumisen ja erot selvästi jo paljaalla silmällä, ja pisteiden määrä skaalautuu kuvion pinta-alan mukaan (Kuvat 8 - 10). Laserkeilauksella tuotetut puukartat sisälsivät poikkeuksetta enemmän pisteitä kuin dronen puukartat (taulukko 4).

Taulukko 4. Pisteiden (puiden) määrä puukartta kohtaisesti ja niiden väliset minimi, maksimi ja keskiarvo etäisyydet metreinä.

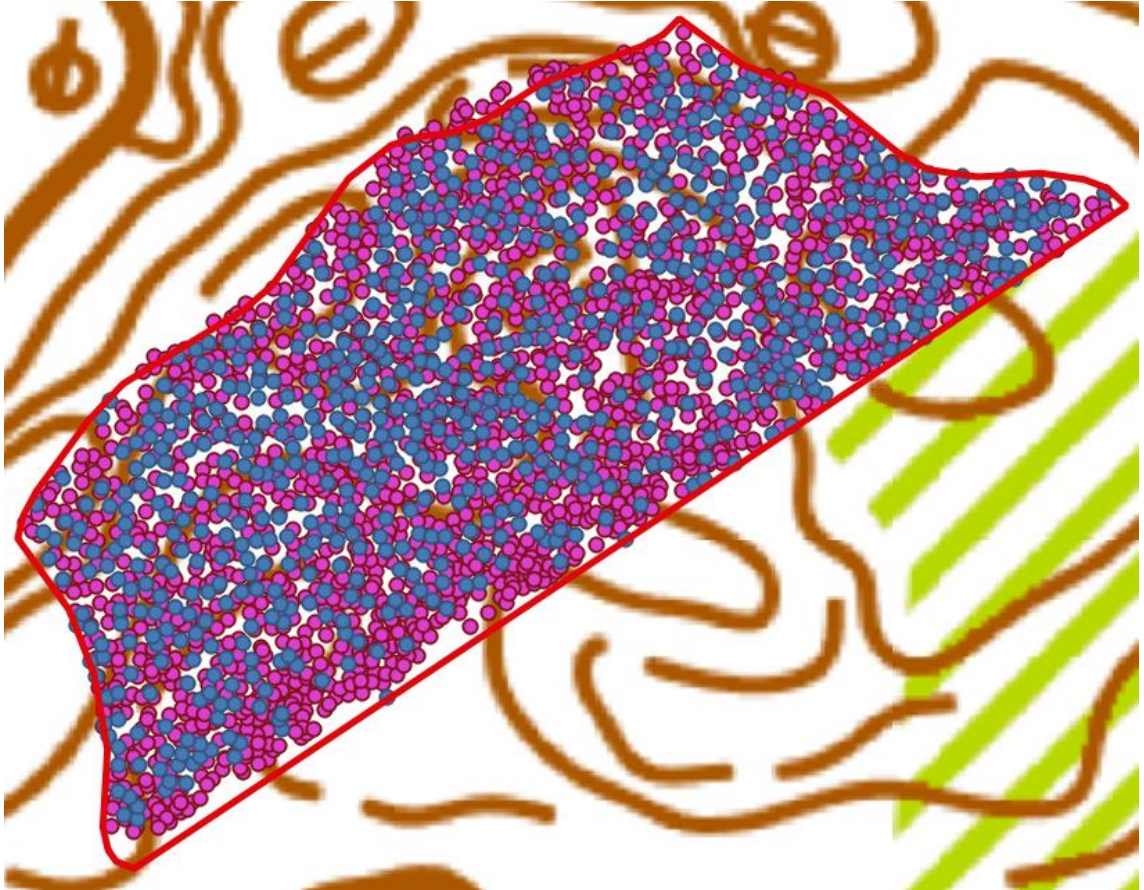
Mikrokuvio	Laserkeilaus puukartan pisteiden määrä	Drone puukartan pisteiden määrä	Minimiarvo (m)	Maksimiarvo (m)	Keskiarvo (m)
367	253	178	0.14	4.21	1.57
398	517	292	0.07	4.68	1.74
444	1008	473	0.02	4.61	1,26
456	2062	735	0.03	3	1.07



Kuva 8. Drone ja laserkeilauksella estimoitujen puukarttojen pisteiden vertailu. Kuvassa mikrokuviot vasemmalta oikealle 367 ja 398. Dronen pisteet sinisellä ja laserkeilauksen liilalla.



Kuva 9. Kuvion 444 drone- ja laserkeilauksella estimoitu puukarttojen vertailu. Kuvassa dronen pisteet sinisellä ja laserkeilauksen liilalla.



Kuva 10. Kuvion 456 drone- ja laserkeilauksella estimoitu puukarttojen vertailu. Kuvassa dronen pisteet sinisellä ja laserkeilauksen liilalla.

6.4 Dronen ilmakekuva mosaiikkien ja puukartan vertailu

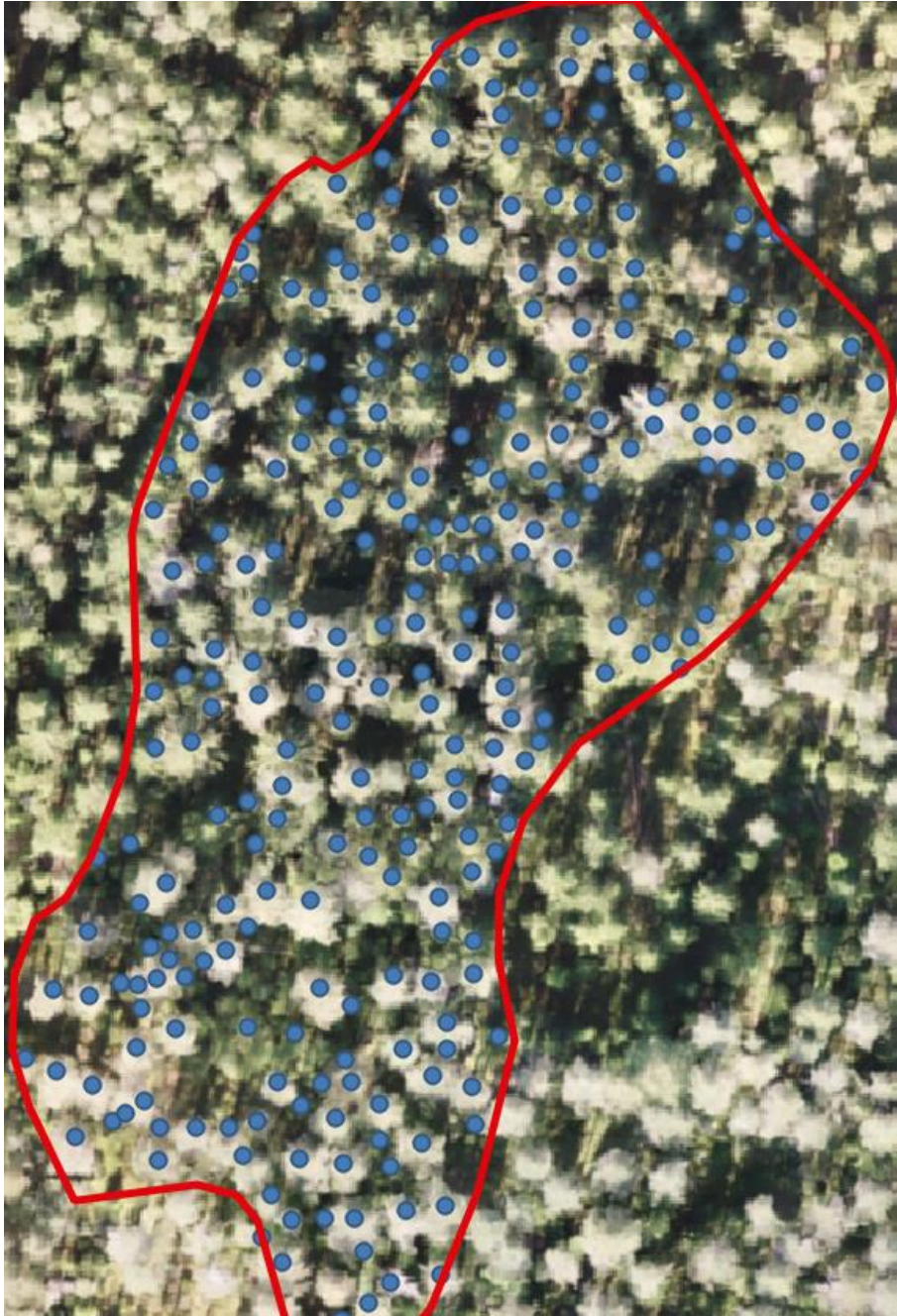
Laskettiin puunlatvukset mekaanisesti, eli perinteisellä ilmakekuvatulkinalla kahdelle pienemmälle mikrokuviolle. Neljästä kuviosta oli droneaineistoa ja kahdessa niistä oli epäselvät mosaiikit, joten niistä en laskenut latvuksia. Taulukossa 5 ilmenee tulokset laskennasta. Kahdessa mikrokuviossa oli dronella havaittu enemmän puita, mitä mekaanisesti laskettiin. Zoomatessa lähemmäksi kuvaa paremman puustotulkinnan toivossa kuvan laatu heikkenee merkittävästi. Kokeiltiin myös asettaa laserkeilauksen havaitsemat pisteet ortomosaiikille (Kuva 11). Laserkeilaus pisteitä on huomattavasti enemmän verrattuna dronen pisteisiin (253 kpl).

Taulukko 5. Pisteet puukartoilla. Sarakkeissa kappalemäärä tunnistetuille pisteille ja erotus sarakkeessa montako pistettä enemmän/vähemmän oli toisessa. Referenssi kuvat löytävät alhaalta (Kuvat 11 - 12).

Mikrokuvio	Dronen tuottaman puukartan pisteet	Mekaanisesti lasketut pisteet	Erotus
367	178	132	46
398	292	182	110

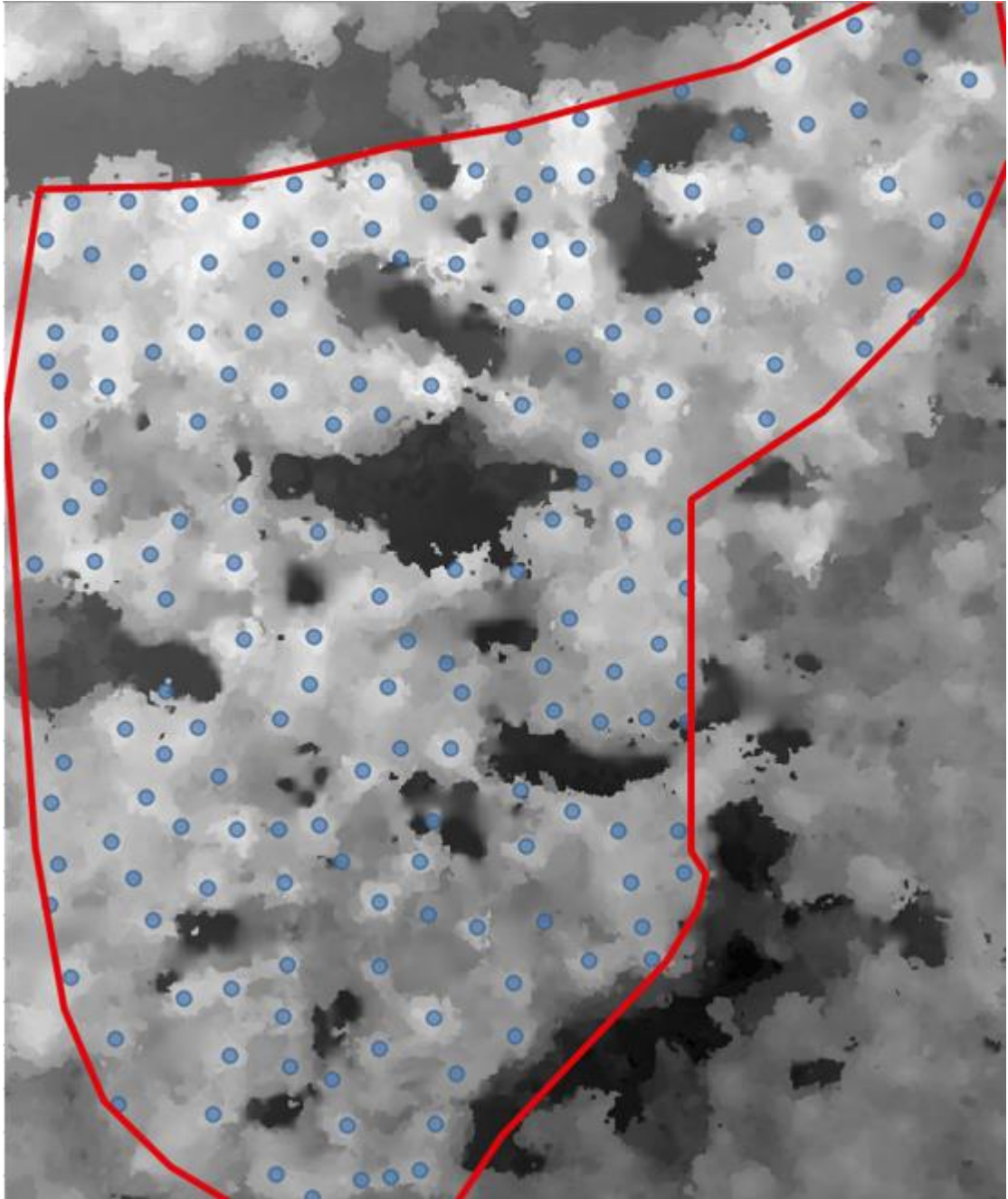


Kuva 11. Kuvion 367 dronen ortomosaiikki. Mosaiikin päällä drone- sekä laserkeilaus puukarttojen pisteet. Dronen pisteet sinisellä ja laserkeilauksen liilalla.



Kuva 12. Mikrokuvion 398 dronen ortomosaiikki ja drone puukartan pisteet sen päällä.

Mikrokuvion 367 mosaiikki ja digitaalinen maastomalli (DEM) olivat parhaita neljästä mikrokuvioista, joten katsottiin tarkemmin digitaalisen maastomallin (DEM) ominaisuuksia (kuva 13). Kuvassa valkoisimmat kohdat ovat korkeimpia kohtia maastossa, ja ne ovat tässä tapauksessa puiden latvuksia. Mustat kohdat ovat aukkoja metsikössä, mutta aukkoissakin voi olla pienempiä puita, sillä ilmakuvista niitä ei vain ole niin helppo tunnistaa. Havainnoimalla digitaalisen maastomallin korkeita kohtia (puita), huomaa puiden sijoittelun logiikan.



Kuva 13. Digitaalinen maastomalli (DEM), mikrokuviolta 367. Korkeimmat kohdat vaaleasta tummempaan. Maastomallin päällä dronella tunnistetut latvukset punaisella.

7 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla tilajärjestys mittaamenetelmiä. Tutkimus oli osittain onnistunut. Pystyttiin tuottamaan tilajärjestysindeksit, mutta ei vertailemaan niitä tilastollisesti. Mittauksia vertaillen selvisi, että kaikki menetelmät olivat riittävän tarkkoja tilajärjestyksen määrittämisessä.

Tilajärjestykselle on viime vuosina tehty muutamia tutkimuksia. Lähinnä tutkien sen soveltuvuutta harvennustarpeen, taimien täydennysistutuksen tarpeellisuuden selvittämisessä ja virtuaalisen metsän tuottamisessa. Tilajärjestys onkin ajankohtainen ja kiinnostava aihe varmasti monille. Tietoa hankkiessani en törmännyt samantyyliisiin vertaileviin tutkimuksiin tilajärjestyksestä, joten voisi olettaa tämän tutkimuksen olevan hyödyllinen tilajärjestyksestä kiinnostuneille.

7.1 Tulosten tarkastelu

Pippuri, Kallio, Maltamo, Peltola ja Packalén väitöskirjatyössään (2012) mittasivat 28 mikrokuviota. He käyttivät t-square -menetelmää sekä laserkeilausta mikrokuvioiden tilajärjestyksen selvittämiseen. Tutkimuksen tulokset olivat enimmäkseen satunnaisesti jakautuneita, joten on pääteltävissä satunnaisten metsiköiden enemmistö edustuksen suhteessa muihin tilajärjestyksiin. Tässä opinnäytetyössä mitattiin 52 mikrokuviota, joista 4 oli ryhmittäistä ja loput satunnaisia. Tämä vahvistaa Pippurin ym. (2012) tuloksia tilajärjestyksien jakaumasta mikrokuviolla.

Maastomittaus antoi t_n -indeksin perusteella tarkkaa tietoa kohteesta, eikä poikennut paljoa muiden mittaamenetelmien tuloksista. Näin ollen T-square -menetelmä on hyvä tilajärjestyksen mittaamenetelmä, ja sillä on tuotettu luotettavaa tietoa Virtuaalimetsä 2.0 -hankkeelle. Aineisto jäi vähäiseksi dronen osalta, joten ei pystytä tutkimaan tilastollisesti menetelmien paremmuutta toisiinsa nähden. Pintapuolisesti tarkasteltuna mittaamenetelmät ovat yhtä tarkkoja.

Harvapulssinen laserkeilausaineisto ei kykene tunnistamaan yhtä tarkasti kuin tiheäpulssinen aineisto. Tällä aineistolla ainoa mahdollinen menetelmä oli aluepohjainen (ABA), jolla taas olisi parempi tarkastella kokonaiskuvaa, eikä yksittäisten puiden tarkkoja sijainteja. Aluepohjainen menetelmä edellyttää metsävaratietoa inventointikohteesta, jota olikin käytössä, mutta ei välttämättä ajantasaisista. (Holopainen, Hyyppä, & Vastaranta 2013, 27 - 28.) Muun muassa Peuhkurinen on tutkinut puutunnusten estimointia ilmasta tapahtuvalla laserkeilauksella tutkimuksessaan (2011); tutkimus tulosten perusteella ryhmittäisyys ja useammat latvuserrokset aiheuttavat vaikeuksia laserkeilaukselle. Uuttera, Haara, Tokola ja Maltamo tekivät samankaltaisia havaintoja ilmakuvien osalta tutkimuksessaan (1998). Näiden tutkimusten valossa tämän opinnäytetyön lähimmän naapurin indeksin tulokset saattavat olla varsinkinkin ryhmittäisemmissä osissa metsikköä harhaisia. Tietysti tämä päätelmä menee myös toiseen suuntaan; satunnaisesti luokitellut saattavat olla virheellisesti luokiteltuja, niiden tiheyden vuoksi. Tiheä latvuspeite aiheuttaa harhaa ilmasta tapahtuvalle kaukokartoitukselle. Selittäväenä tekijänä ryhmittäiselle tilajärjestykselle on pieni kehitysluokka, harventumattomuus ja hyvä kasvupaikka ryhmittäisten puiden sijainnissa. Toisena epäluottamusta herättävänä tekijänä laserkeilauksella on, ettei se perustu tosiaineistoon, ja poikkeama t_n -indeksistä on liian suuri etenkin ryhmittäisissä tapauksissa.

Puukartat on tehty yksinpuintulkinnalla puuston pituusmallia (CHM) hyödyntämällä. Aikaisempi tutkimus, joka on käyttänyt samantyylistä menetelmää laserkeilaukselle, havainnoi, että puuston pituusmallin tuottotapa ja resoluutio vaikuttavat yksinpuintulkintaan (Barnes, Balzter, Barret, Eddy, Milner & Suárez 2017). Ilmakuvien resoluutio oli kelvollinen, mutta ei tosiaankaan paras mahdollinen. Näin ollen kuvista tuotetut pistepilvet eivät ole huippuluokkaa, joka taas johtaa tulkintavirheisiin puuntunnistuksessa. Pienemmät puut saattavat jäädä huomiotta ja isompien puiden oksat saattavat tulla luokitelluksi puiksi. Metsikön heterogeenisuus edesauttaa harhaisia tulkintoja, koska segmentointi algoritmilla on vaikea kuvata vaihtelut metsikössä (puulaji & ikä).

Tämän aineiston perusteella ei voi varmaksi sanoa, että toinen puukartta olisi tarkempi kuin toinen, mutta droneaineisto on lähtökohtaisesti tarkempaa kuin harvapulssinen laserkeilausaineisto. Laserkeilauksen data on estimoitua, eli dronen tosiaineisto (ground truth) on tarkempaa ja ajankohtaista. Lisäksi tutkimuksessa käytetyt puukartat olivat ensimmäiset versiot, mitä Arbonaut oli saanut tehtyä, joten niissä olisi vielä ollut parantamisen varaa.

Mohan, Silva, Klauberg, Jat, Catts, Cardil, Hudak & Dia ovat tutkineet puidenlatvusten tunnistamista yksinpuintulkinnalla käyttämällä dronea ja puiden pituusmallia (CHM) tutkimuksessaan (2017). Tutkimuksen mukaan on mahdollista saada hyviä tuloksia latvuksen tunnistuksessa käyttäen pituusmallia ja lokaaleja maksimeja. Homogeenisissa, avarien latvusten metsissä tunnistus oli helpompaa, kun taas heterogeenisissa tiheissä metsissä ei niinkään.

Mohanin ym. (2017) tutkimuksessa oli 367 puuta, jotka piti havaita edellä mainituilla menetelmillä. Algoritmi ei havainnut 55 puuta ja löysi 46 ylimääräistä puuta. Tulosten perusteella menetelmä löysi enemmän puuta kuin enemmän.

Jos tätä tulosta vertaa tämän opinnäytetyön tuloksiin, niin täytyy huomioida kuvien eriävä laatu sekä erilainen metsäkuvio. Kahdessa mikrokuviossa, joista laskettiin latvukset, oli havaittavissa vähemmän puuta mekaanisesti laskettuna, mitä pituusmallista oli havaittu. Kun asetettiin laserkeilauksen pisteet mosaikille, niin osa niistä menee selvästi ohi latvuksista, mikä selittää pisteiden suuren määrän. Laserkeilaus on tulkinut osan suuremmista oksista uusiksi puiksi, tämä selittää suuremman pisteiden havainto määrän.

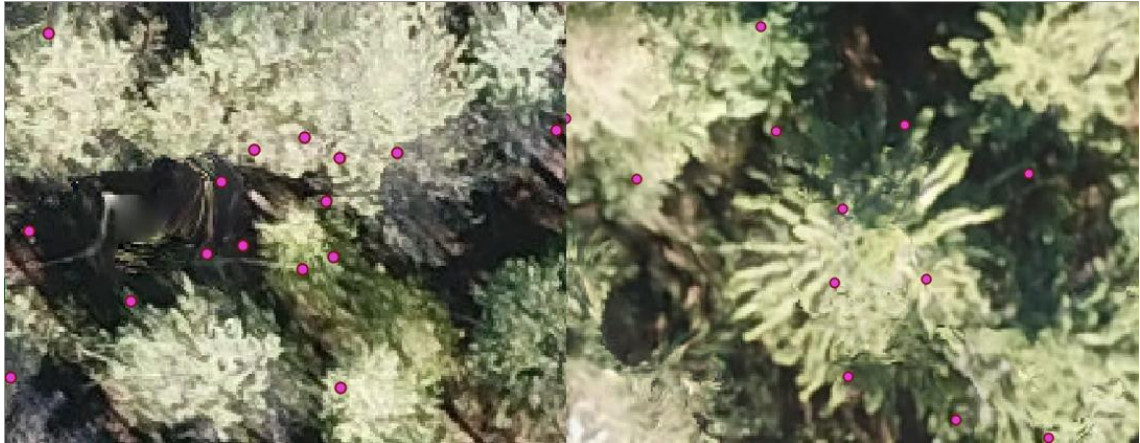
7.2 Luotettavuus

Tutkimus perustuu tilajärjestysindeksien vertailuun. Maasto- ja droneaineisto on itse kerättyä, kun taas laserkeilausaineisto on Arbonautilta. Maastomittauksessa on käytetty tieteellisesti validia t-square ja t_n-indeksiä sekä laserkeilauksen data

perustuu avoimeen aineistoon. Drone kuvausten kohdalla on parantamisen varaa, koska joissakin ortomosaiikissa on suuria vääristymiä, joka vaikeuttaa puukartan luontia (kuva 14). Myös mekaanisesti laskeminen tällaisesta vääristyneestä mosaiikista on vaikeaa, kuten myös latvusten segmentointi. Lähtökohtaisesti tutkimuksella ei ole todistuksellista arvoa minkään tietyn tilajärjestysmittausmenetelmän puolesta. Lähinnä koska tilastollisesti aineisto ei ole riittävän kattava. Puukartoissa olevat harhaiset puutulkinnat muuttavan puiden välisiä oikeita etäisyyksiä. Tästä johtuu myös harhaiset tilajärjestysindeksit puukartoille.



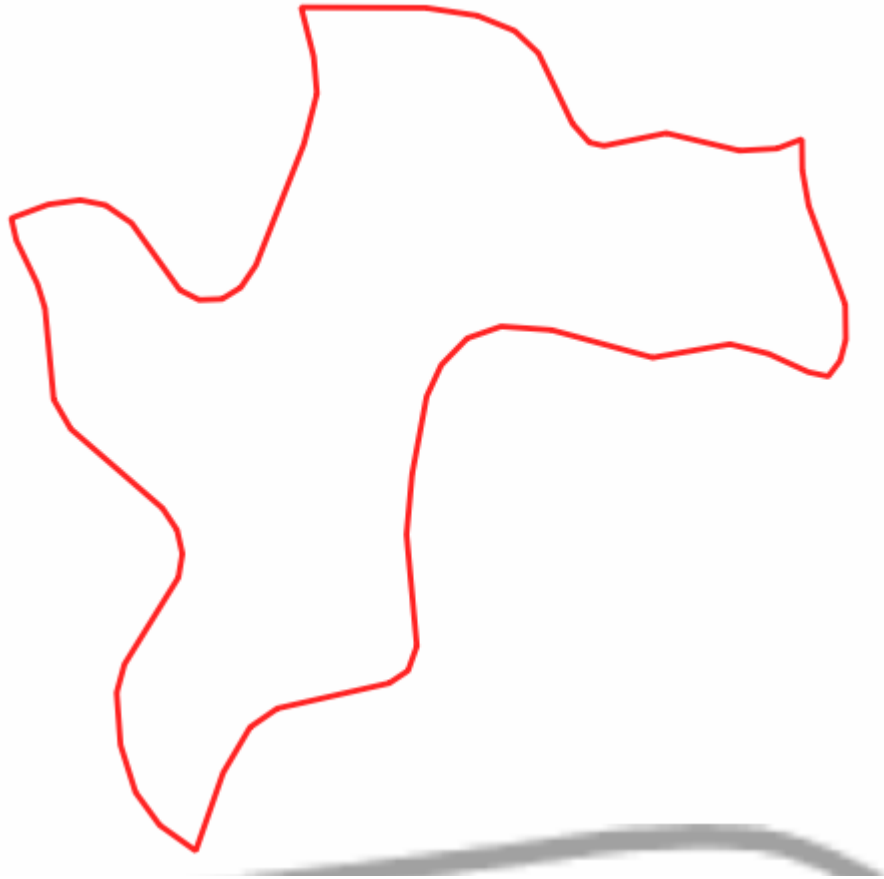
Kuva 14. Suttuisuutta mikrokuvion 444 mosaiikissa.



Kuva 15. Mikrokuviot 444 & 367. Mosaiikkien päälle asetettu laserkeilauksen puukartan pisteet.

Laserkeilauksella tuotetuissa puukartoissa pisteitä oli enemmän kuin dronella tuotetuissa puukartoissa. Suuri määrä pisteitä johtui estimoidusta tiedosta, eli heikommasta laadusta suhteessa dronen tosiaineistoon. Laserkeilauksen puukartta luotiin asettelemalla puulistan puut arvioille niiden mahdollisista sijainnista lokaalien maksimien mukaan. Onko metsävaratieto ajantasaista laserkeilauksineiston kanssa, jonka mukaan puut on aseteltu. Jos metsävaratiedon mukaan puita on enemmän mitä lokaaleja maksimeja, niin ne on sijoitettu arvioille niiden sijainnista puukartalla. Tästä voisi johtua laserpisteiden erikoinen sijoittelu ja suuri määrä puukartoilla. Kun pisteiden sijaintia vertaa latvuksiin huomaa niiden harhaisuuden (kuva 15). Monet pisteistä eivät ole kohdistuneet latvuksiin oikein sekä niitä on liikaa sijoitettuna yhteen latvukseen.

Mikrokuviointi Rauansalolla tehtiin ennen Virtuaalimetsä 2.0 -hankkeen alkua. Mitatessa maastoaineistoa, huomasin mikrokuvioiden rajojen olevan välillä kyseenalaisilla paikoilla. Mikrokuvioiden tarkoitus oli luoda homogeenisia metsiköitä, mutta välillä mukaan on päässyt toisesta kuvoista erilaisia puita, mikä johtaa vääristymiin tilajärjestyksessä. Osa Mikrokuvioista oli myös muodoltaan epäkäytännöllisen muotoisia (kuva 16). Tämä johti varmasti mittausvirheisiin maastomittauksessa, koska on hankala pysyä kartalla ja samalla kulkea luotisuoraan, kun kuvio kiemurtelee.



Kuva 16. Yksi otoksen mikrokuvioista, joka oli epäkäytännöllisen muotoinen.

Tutkimuksenmukaisissa mittauksissa on pyritty välttämään virheitä, mutta etenkin maastomittauksessa on voinut tapahtua inhimillisiä erheitä. Tutkimuksen luotettavuutta voidaan tarkastella reliaabeliuden ja validiuden näkökulmasta. Reliaabelius tarkoittaa mittaustulosten toistettavuuden mahdollisuutta, eli saadaanko esimerkiksi maastomittauksesta samat tulokset, jos toinen henkilö tekisi ne. Validius taas tarkoittaa tutkimuksen pätevyyttä, eli mitataanko, mitä on tarkoitus mitata. (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007, 226.) Tutkimus noudattaa hyvää tieteellistä käytäntöä sekä ohjeita tieteellisistä menettelytavoista, jotka opetusministeriön asettama tutkimuseettinen neuvottelukunta on asettanut (Hirsjärvi ym. 2007, 23).

Pippuri ym. (2012) käyttivät tutkimuksessaan mikrokuvioihin samankaltaista aluepohjaistulkintaa (ABA) laserkeilaukselle kuin tässä tutkimuksessa. He tulivat siihen tulokseen, että menetelmällä pystyy hyvin tunnistamaan puiden tilajärjestyksiä. Suurimmat virhelähteet heidän mukaansa tulevat ryhmittäisten tilajärjestyksien luokittelusta, mutta samankaltaisia virheitä ilmeni myös satunnaisten ja

säännöllisten tilajärjestyksien kohdalla. Syynä on vaikeus tunnistaa laserkeilauksella tiheitä puustoryhmiä, ja puiden väliset etäisyydet eivät aina ole eriävät eri tilajärjestyksillä.

Mittausmenetelmillä oli kullakin hyvät ja huonot puolensa. Maastomittaus antoi T-square -menetelmällä riittävän tarkkoja tuloksia, mutta menetelmä on aikaa vievä ja raskas toteuttaa. Avoin laserkeilausaineisto ei ole niinkään tarkkaa, mutta se on käytettävissä kaikille. Tosin laserkeilausaineiston hyödyntäminen edellyttää erikoisosaamista. Dronen tuottaman aineiston laatu riippuu kamerasta, mutta lähikohtaisesti se on tarkempaa kuin laserkeilauksella estimoitu aineisto. Tosin dronen hankkiminen on investointi ja kuvien prosessointi vaatii myös erityisosaamista. Mittausmenetelmä tulisi valita tarkoituksenmukaisesti; suurpiirteinen tieto tilajärjestyksestä onnistuu opinnäytetyön kuvaamilla menetelmillä. Tarkempaa tietoa haluttaessa kannattaa harkita parempi laatuista aineistoa.

7.3 Jatkokehitysmahdollisuudet

Tutkimuksen tuloksia voi hyödyntää jatkossa, kun harkitaan mittausmenetelmää tilajärjestykselle. Mikäli dronella olisi lisää materiaalia voitaisiin tehdä tilastollista tutkimusta menetelmien tuottamien indeksien eroista. Mahdollisilla tulevilla drone kuvauksilla olisi syytä varustautua paremmalla dronella sekä huomioida mahdolliset mittausvirheitä aiheuttavat seikat.

Olisi myös mielenkiintoista nähdä, millaisia tuloksia saataisiin tiheäpulsisella laserkeilausaineistolla. Puukarttojen parantelu olisi myös hedelmällistä jatkotutkimuksen kannalta, koska niissä oli puiden sijoittelun suhteen parantamisenvaraa. Itse 52 mikrokuvion aineisto olisi riittävä, joten sitä jatkotutkimalla saataisiin lisää selville tilajärjestyksestä ja sen tutkimusmenetelmistä. Mikrokuvioiden kuviointia voisi tarkentaa, sekä mahdollisissa tulevilla otannoissa valita pois sellaiset kuviot, joiden muoto on epäkäytännöllinen.

Lähteet

- Ahmad, F., Uddin, M. & Goparaju, L. 2018. 3D Mapping by Photogrammetry and LiDAR in Forest Studies. *World Scientific News* 95.
- Ahomaa, O. 2001. Puukartat. Helsingin yliopisto. <https://www.cs.helsinki.fi/u/erkio/klsem01/ahomaa.pdf>. 1.9.2019.
- Barnes, C., Balzter, H., Barret, K., Eddy, J., Milner, J. & Suárez, J. 2017. Individual Tree Crown Delineation from Airborne Laser Scanning for Diseased Larch Forest Stands. <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/3/231/htm>. 12.11.2019.
- Droneinfo. 2019. Ohjeita turvalliseen lentämiseen. <https://www.droneinfo.fi/fi>. 11.9.2019.
- Geocenter. 2017. Topconin lennokkijärjestelmät ja ContextCapture-ohjelmisto. <http://www.geocenter.fi/blogi/tag/pistepilvi/>. 10.11.2019.
- Haggrén, H. 2002. Luento 7: Ortokuvien tuottaminen. https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/7/L7_2005.pdf. 8.10.2019.
- Hirsijärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2007. Tutki ja Kirjoita. Helsinki: Tammi.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5.
- Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyyppä, J. 2009. Yksityiskohtaisen metsävaratiedon tuottaminen – kohti täsmämetsätaloutta? *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009, 229-234.
- IB Geography. 2011. Nearest neighbor index. <https://www.geoib.com/nearest-neighbor-index.html>. 25.9.2019.
- Innocad. 2019. Ortokuvat ja 3D-pistepilvet. <http://www.innocad.com/ortokuvat-ja-3d-pistepilvet/>. 18.10.2019.
- Kantola, T. 2010. Pro gradu -tutkielma Lahopuun spatiaalinen jakautuminen Suomen talousmetsissä. Helsingin Yliopisto.
- Kellomäki, S., Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. 1988. Männyn laatu- kasvatus. Tutkimuksen loppuraportti.
- Kellomäki, S. 1991. Metsänhoito. Joensuu: Joensuun yliopisto.
- Kellomäki, S. 2005. Metsäekologia. Joensuu: Joensuun yliopisto.
- Kenkel, N.C. 1988. Pattern of Self-Thinning in Jack Pine: Testing the Random Mortality Hypothesis. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2307/1941257>. 1.10.2019.
- Koppa. 2019a. Vertaileva tutkimus. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/vertaileva-tutkimus>. 12.9.2019.
- Koppa. 2019b. Määrällinen tutkimus. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus>. 12.9.2019.
- Korhonen, L., Pippuri, I., Packalén, P., Heikkinen, V., Maltamo, M. & Heikkilä, J. 2013. Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fennica* vol. 47 no. 2 article id 952.
- Mellin, I. 2006. Tilastolliset menetelmät: Varianssianalyysi. <http://math.tkk.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Varanal.pdf>. 14.9.2019.
- Miina, J. 2001. Spatiaalisuus. Julkaisussa: Maltamo, M. ja Laukkanen, S. (toim.). *Metsää kuvaavat mallit*. *Silva Carelica* 36: 134 - 155.

- Mohan, M., Silva, C.A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A.T. & Dia, M. 2017. Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest.
- Nasa. 2019. Remote sensing. <https://earthdata.nasa.gov/learn/remote-sensors>. 11.9.2019.
- Peuhkurinen, J. 2011. Estimating tree size distributions and timber assortment recoveries for wood procurement planning using airborne laser scanning.
- Peuhkurinen, J. 2019. Laserkeilauksella estimoitu puukartta. jussi.peuhkurinen@arbonaut.com. 30.10.2019.
- Pippuri, I., Kallio, E., Maltamo, M., Peltola, H. & Packalen, P. 2012. Exploring horizontal area-based metrics to discriminate the spatial pattern of trees and need for first thinning using airborne laser scanning. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 85, Issue 2, April 2012, Pages 305–314.
- Pohtila, E. 2001. Miten puut sijaitsevat metsässä? *Metsätieteen aikakauskirja*. Vol. 1:50–54.
- Prodigious. 2019. Laserkeilauksen ja pistepilven hyödyt. <http://prodigious.tamk.fi/laserkeilaus-ja-tietomallinnus-korjaushankkeissa/laserkeilauksen-ja-pistepilvien-hyodyt/>. 10.11.2019.
- Pukkala, T. 1988. *Metsän kaukokartoituksen perusteet*. Joensuu: Joensuun yliopisto.
- Pukkala, T. 1990. A method for incorporating the within-stand variation into forest management planning, *Scand. J. For. Res.*, 1990, vol. 5.
- Pukkala, T., Karsikko, J. & Kolström, T. 1992. A spatial model for the diameter of thickest branch of Scots pine. <https://www.silvafennica.fi/pdf/article5490.pdf>. 3.10.2019.
- Pukkala, T. 2007. *Metsäsuunnittelun menetelmät*. Joensuu: Joen Forest Program Consulting Ay.
- Savisaari, A. 2017. Pistepilvitietojen hyödyntäminen korjausrakennushankkeen arkkitehtisuunnittelussa. <https://tutcris.tut.fi/portal/files/10992543/Savisaari.pdf>. 14.11.2019.
- Tokola, T., Hyppänen, H., Miina, S., Vesa, L. & Anttila, P. 1998. *Metsän kaukokartoitus*. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta.
- Utterä, J., Haara, A., Tokola, T. & Maltamo, M. 1998. Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs.
- Winther, S.M. 2019. Mikä on drooni – ja miksi sellainen kannattaisi hankkia? <https://digi-kuva.fi/valokuvauslaitteet/pienoishelikopterit/mika-on-drooni-ja-miksi-sellainen-kannattaisi-hankkia>. 11.9.2019.
- Ympäristö. 2004. *Kaukokartoituksen tietopaketti*. [http://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_\(2004\).pdf](http://www.i4.ymparisto.fi/i4/fin/tuotteet/Kaukokartoituksen_tietopaketti_(2004).pdf). 11.9.2019.
- Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2014. *Hyvän metsänhoidon suositukset – METSÄNHOITO*. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.

