

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Metsätalouden koulutus

Ravaska Mari
Solehmainen Anu

FOTOGRAMMETRIALLA JA YKSINPUINTULKINNALLA TUOTE-
TUN PUUSTOTIEDON LUOTETTAVUUS

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2021



OPINNÄYTETYÖ
Huhtikuu 2021
Metsätalouden koulutus

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

Tekijä(t)
Ravaska Mari ja Solehmainen Anu

Nimeke
Fotogrammetrialla ja yksinpuintulkinnalla tuotetun puustotiedon luotettavuus

Toimeksiantaja
Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjala Ry

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin fotogrammetrian avulla tuotetun puustotiedon luotettavuutta eri kehitysluokissa. Työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko tällä keinolla tuotettua puustotietoa käyttää hyödyksi käytännön työssä.

Tutkimukseen valittiin mitattavia kuvioita kolmen eri metsätilan alueelta. Tilat sijaitsivat Joensuun ja Liperin alueella. Kuviot pyrittiin valitsemaan jokaisesta kehitysluokasta niin, että jokaista pääpuulajia (mänty, kuusi, koivu) tulisi mitattavaksi kaksi kuviota. Kuvioille muodostettiin koealaverkko ja koealoille navigoitiin maastossa GPS-paikantimen avulla. Koealana käytettiin ympyräkoealaa, joilta mitattiin jokaisesta koealan sisään jäävästä puusta rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Aineisto kerättiin maastolomakkeelle ja vietiin Exceliin. Tuloksia tarkasteltiin 95 %:n luottamusvälin avulla. Tuloksia analysoitiin Excel-ohjelmalla.

Tutkimuksen perusteella fotogrammetrian avulla tuotettu puustotieto ei ole sellaisenaan hyödynnettävissä metsätalouden työssä. Kehitysluokassa T2 ilmakuvilta laskettu runkoluku ei ole realistinen taimikoiden todellisiin runkolukuihin verrattuna. Myöskään kehitysluokassa 02 ei näin tuotettua puustotietoa voida hyödyntää, koska maastoinventoinnissa todennetun puuston määrä eroaa huomattavasti ilmakuvilta lasketun puuston määrästä. Kehitysluokassa 03 pääpuulajin ollessa mänty voidaan kuvilta laskettua puuston määrää pitää luotettavana männyn osalta. Kehitysluokassa 04 ilmakuvilta laskettua puuston määrää ei voida pitää luotettavana. Tässä kehitysluokassa maastossa inventoidun puuston määrän ja ilmakuvilta lasketun puuston määrän ero on suuri.

Kieli
suomi

Sivuja 35
Liitteet

Asiasanat

Droonit, fotogrammetria, ilma-alukset, Joensuu, kuvaus, kaukokartoitus, Liperi, metsäva-
rat, tieto



THESIS
April 2021
Degree Programme in Forestry

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Authors
Ravaska Mari and Solehmainen Anu

Title
Reliability of Tree Stand Data Acquired by Photogrammetry And Single Tree Detection

Commissioned by
Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjala Ry

Abstract

The thesis investigated the reliability of forest data produced by photogrammetry in different development classes. The aim of the work was to find out if the forest information produced by this method could be used in practical work.

Measurable areas from three different forest properties were selected for the study. The properties were located in Joensuu and Liperi. The aim was to select the areas from each development classes so that two areas of each main tree species (pine, spruce, birch) would be measurable. The test area network was formed for the areas. The test areas were navigated in terrain by using a GPS locator. The test areas were circular sample plots, from which the breast height diameter and length were measured from each tree within the plot. The data were collected on a form and exported to Excel. Results were reviewed using a 95 % confidence interval. The results were analyzed using the Excel software.

Based on this study, the forest information produced by photogrammetry cannot be utilized in forestry. In development class T2, the number of stems calculated from aerial photographs is not realistic compared to the actual number of stems. Also, in development class 02, the forest data cannot be utilized because the amount of forest verified in the field inventory differs significantly from the amount of forest calculated from the aerial photographs. In development class 03, when the main tree species is pine, the amount of forest calculated from the photographs can be considered reliable for pine. In development class 04, the amount of forest calculated from the aerial photographs cannot be considered reliable. In this development class the difference between the amount of forest verified in the field inventory and the amount of forest calculated from the photograph is large.

Language
Finnish

Pages 35
Appendices

Keywords

drone scan, photogrammetry, drone, remote sensing, forest resource information

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Metsävaratiedon tuottaminen.....	7
2.1	Kuvioittainen arviointi.....	7
2.2	Kaukokartoitus	8
2.2.1	Laserkeilaus.....	8
2.2.2	UA-lennokki	9
3	Dronen käyttö metsätaloudessa	10
3.1	Metsätuhojen kartoitus.....	10
3.2	Taimikon hoitotarpeen kartoitus.....	11
3.3	Työnjäljenseuranta	11
3.4	Energiapuun mittaus.....	12
3.5	Metsäluonnon monimuotoisuuden turvaaminen	12
4	Fotogrammetria metsävaratiedon tuottamisessa	13
4.1	Fotogrammetria	13
4.2	Fotogrammetria dronekuvauksessa.....	14
4.3	Kuvien prosessointi.....	15
5	Tutkimuksen tavoite ja tarkoitus.....	17
6	Aineiston käsittely	18
6.1	Maastomittaukset.....	18
6.2	Puustotietojen laskenta.....	20
6.3	Luottamusvälin laskenta	22
7	Tulokset	24
7.1	Kehitysluokat T1 ja T2	24
7.2	Kehitysluokat 02, 03 ja 04.....	25
8	Pohdinta.....	29
8.1	Tulosten tarkastelu	30
8.2	Tutkimuksen luotettavuus	31
8.3	Jatkokehitysehdotukset	32
	Lähteet.....	33

Lyhenneluettelo

ALS	Airborne laser scanning, lentolaserkeilaus tai ilmalaserkeilaus.
DEM	Digital Elevation Model, korkeusmalli.
KEMERA	Kestävän metsätalouden rahoituslaki
LiDAR	Light Detection and Ranging, lasertutka.
UA	Unmanned Aircraft, miehittämätön lentävä ilma-alus eli lennokki
UAS	Unmanned Aerial System, järjestelmä, johon kuuluu ohjainyksikkö, ohjainjärjestelmä sekä miehittämätön lennokki.
VMI	Valtakunnan metsien inventointi.

1 Johdanto

Metsätaloudessa vuosituhanen vaihde oli kaukokartoitusmenetelmien kannalta merkittävää aikaa. Tuolloin kehitettiin esimerkiksi laserkeilaus, jonka avulla kohdeesta voidaan tuottaa kolmiulotteisia pistepilviä. Tätä tekniikkaa ryhdyttiin nopeasti hyödyntämään metsätaloudessa ja se on käytössä lähes kaikissa metsäorganisaatioissa. Pistepilviä on mahdollista nykypäivänä tuottaa myös muista aineistoista, kun maastossa tehtävät lasermittaus ja lennökkikuvaus ovat yleistyneet. (Holopainen 2019, 1.)

Metsäkeskus vastaa osaltaan ajantasaisen metsävaratiedon tuottamisesta valtakunnan metsien inventoinnin avulla. Inventointitietoa päivitetään jatkuvasti esimerkiksi metsänkäyttöilmoitusten, Kemera-hakemusten ja ilmakuvioiden avulla. Ajantasaisen metsävaratiedon on oltava saatavilla, koska sitä käytetään laajasti. VMI:n avulla tuotettua metsävaratietoa käytetään esimerkiksi metsäpoliittisen päätöksenteon tukena, alueellisen ja kansallisen metsätalouden suunnittelun pohjana, metsäteollisuuden investointipäätösten tukena sekä metsätalouden kestävyysarvioinnissa. (Metsäkeskus 2016; Luonnonvarakeskus 2015.)

Metsävaratietoa tuotetaan kuvioittaisen arvioinnin lisäksi myös erilaisten kaukokartoitusmenetelmien avulla. Näitä menetelmiä ovat esimerkiksi laserkeilaus ja UA-lennokin avulla tehtävä ilmakuvaukset. Puustotieto tuotetaan ilmakuvilta fotogrammetrian avulla. Fotogrammetria on tekniikka, jolla saadaan tuotettua luotettavaa tietoa fyysisistä esineistä tai ympäristöstä tallentamalla, mittaamalla ja tulkitsemalla valokuvia. (Vinni 2003). Kaukokartoitusmenetelmien avulla pyritään tehostamaan metsäsuunnittelua ja puunkorjuuta sekä kehittämään metsänarvon määrittämistä (Holopainen 2019, 1). Tarkoituksena on siis tuottaa metsävaratietoa nopeammin, tehokkaammin ja edullisemmin, kuin maastomittauksilla.

Opinnäytetyössä käsitellään metsävaratiedon tuottamista erilaisin kaukokartoituksen menetelmin. Pääpaino on fotogrammetriaan perustuvassa UA-lennokilla toteutetussa kaukokartoituksessa. Tämä opinnäytetyö tehtiin Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjala ry:n kanssa. Työn tarkoituksena on tutkia UA-lennokilla

kuvatun ilmakehän aineiston perusteella tuotetun puustotiedon luotettavuutta eri kehitysluokissa (pieni taimikko – T1, varttunut taimikko - T2, nuori kasvatusmetsikkö - O2, varttunut kasvatusmetsikkö - O3 ja uudistuskypsä metsikkö - O4) ja todentaa tämän puustotiedon paikkaansa pitävyys.

2 Metsävaratiedon tuottaminen

Metsävaratiedon tuottamisessa kuvioittainen arviointi on nykyään käytetyin inventointimenetelmä yksityismetsissä. Kuvioittaisen arvioinnin lisäksi metsävarojen inventointiin on kehitetty kaukokartoitukseen perustuvia menetelmiä, joista tunnetuin on laserkeilaus. (Juntunen 2016, 7.) Näistä menetelmistä kerrotaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Opinnäytetyön kannalta keskeisin kaukokartoitusmenetelmä on UA-lennokilla tapahtuva ilmakehäkuvaus.

2.1 Kuvioittainen arviointi

Kuvioittaisessa arvioinnissa metsäalue ennakkokuvioidaan ilmakehien ja kartan avulla metsikkökuvioiksi, joiden puusto tai maapohja muodostavat yhtenäisen alueen. Kuvioinnin tavoitteena on, että kukin kuvio muodostaa käsittely-yksikön, joka voidaan esimerkiksi harventaa, uudistaa tai raivata yhtenä kokonaisuutena. Yksittäisen kuvion koon tulisi olla vähintään 0,5 ha, koska pienten alueiden käsittely on kallista. Kuvioittaisella arvioinnilla tuotetun tiedon hinta on noin 20 €/ha. (Auvinen 1997, 83; Kangas, Haara, Holopainen, Luoma, Packalen, Packalen, Ruotsalainen & Saarinen 2019, 9.)

Kuvioittaisessa arvioinnissa kuvioille arvioidaan silmävaraisesti tunnuksat. Apuna arvioinnissa käytetään relaskooppi-, pituus- ja ikämittauksia. Mittauksia tehtäessä on tärkeää huomioida, että ne edustavat koko metsikön pinta-alaa mukaan lukien reuna-alueet ja epäedustavat kohdat. Yleisin virhe kuvioittaista arviointia tehtäessä on tehdä havaintoja ja mittauksia ainoastaan kuvioitten keskeltä. (Auvinen 1997, 83.)

2.2 Kaukokartoitus

Kaukokartoituksella tarkoitetaan mittausta, jonka informaatio saadaan ilman fyysistä kosketusta kohteeseen. Tämä informaatio perustuu tietoon, miten jokin kohde emittoi, absorboi tai heijastaa säteilyä. Tutkittava kohde muodostaa ominaisheijastuksen kuvaajan, mistä eri aallonpituusalueiden heijastussuhteet havaitaan. Kohteen ominaisuudet vaikuttavat ominaisheijastukseen. Ominaisuusheijastukseen vaikuttavat myös monet muut eri tekijät, kuten vuoden- ja vuorokaudenaika, sää ja auringon korkeus. Kaukokartoituskuviin tulkinna on otettava huomioon edellä mainitut muuttujat. Ominaisuusheijastuksen ollessa tunnettu, voidaan tehdä päätelmiä siitä, tuleeko tutkittava kohde erottumaan kuvilta ja minkä sävyisinä se erottuu. Näiden ollessa tiedossa, voidaan arvioida kyseiselle kohteelle optimaalisimmat aallonpituusalueet. Kuvaukseen parhaiten soveltuva ajankohta voidaan valita edellä mainittujen tietojen avulla. Kuvien tulkinna yhteydessä voidaan tehdä päätelmiä kohteen poikkeamista. (Koivunen 2020, 11; Pulkkinen 2020, 12.)

2.2.1 Laserkeilaus

Laserkeilaus on lentokoneesta tehtävä kaukokartoitusmenetelmä, jolla mallinnetaan esimerkiksi pinnanmuotoja tai kasvillisuutta. Metsävaratiedon tuottamiseen laserkeilauksella on kaksi päätekniikkaa: ilmalaserkeilaus eli ALS ja maastolaserkeilaus eli TLS. ALS termiä käytetään lasertutka- eli LiDAR-käsitteen rinnalla, sillä menetelmässä käytetään lasersädettä maanpinnan valaisemiseen ja fotodiodia takaisinsirontasäteilyn rekisteröimiseen. (Holopainen, Hyyppä & Vastaranta 2013, 11 – 12; Juntunen 2016, 9.) Fotodiodi on puolijohde, joka muuttaa valon sähköiseen muotoon (Vuoti 2017, 7).

Laserkeilauksen ideana on, että laserkeilain tuottaa kohteesta kolmiulotteista informaatiota. Tämä informaatio saadaan tuotettua, kun kohteen ja keilaimen välinen etäisyys mitataan laserpulssin kulkuajan perusteella. Kohteeseen osuessaan laserpulssi tuottaa yhden tai useamman paluukäiun, jolloin kohteen etäisyys

keilaimesta voidaan määrittää Z-koordinaatistossa. (Minguet 2013, 6–7; Hyyppä, Holopainen, Vastaranta & Puttonen 2009, 362.)

Laserkeilauksen avulla tehdyn tiedon keräämisen kustannukset ovat laskeneet tasaisesti ja tähän menetelmään perustuvan inventoinnin hinta on noin 5 €/ha. Koko maan kattavissa kuvauksissa hintataso on 15 - 30 €/km². Hintatasoon vaikuttaa eniten keilattavan alueen koko. Lisäksi laserkeilauksen kokonaiskustannuksiin vaikuttavat kaluston siirtokustannukset, jotka vaihtelevat yleensä 3 000 - 6 000 €:n välillä. (Illman & Pökälä 2014, 7; Kangas ym. 2019, 9.)

2.2.2 UA-lennokki

UA-lennokilla tarkoitetaan kauko-ohjattavaa ilmassa liikkuvaa laitetta. Puhekielessä lennokista käytetään yleisesti nimitystä drone. Tämä nimitys on yleisesti käytössä myös käytännön toiminnassa ja myöhemmin UA-lennokkiin viitataan tässä opinnäytetyössä nimellä drone.

Kaukokartoituksessa sen toimintaperiaate on samankaltainen kuin normaalissa lentokoneesta tai helikopterista tapahtuvassa ilmakuvauksessa. Mallinnettavan alueen yli lennetään useita lentojonoja samalla aluetta kuvaten. Lentojonot suunnitellaan siten, että kuvat peittävät osittain toisiaan. Näitä peittoja kutsutaan sivu- ja pituuspeitoiksi. Dronen avulla tehtävässä kuvauksessa peittojen tulee olla suurempia kuin perinteisessä ilmakuvauksessa, jotta kuvien yhdistämisen tuloksena saatava ortokuva ja pistepilvi olisivat tarkempia. Perinteisessä lentokoneesta tehtävässä ilmakuvauksessa pituuspeiton tulee olla 60 % ja sivupeiton 30 %. (Hokkanen 2015, 4; Kallioinen & Laaksonen 2016, 12.)

Drone on osa UAS-järjestelmää, johon kuuluu lennokin lisäksi ohjainyksikkö ja ohjainjärjestelmä. Lennokissa on sisäänrakennettu GPS-vastaanotin, johon lentosuunnitelma voidaan syöttää tietokonetta apuna käyttäen. Lentosuunnitelma varmistaa, että kaikki kuvat otetaan samalta korkeudelta, oikeaan suuntaan ja tasaisin väliajoin. Droneen asennettu kamera tallentaa kuvien lisäksi kuvan

ottohetken, lennokin sijainnin kuvaushetkellä ja lennokin kallistustiedot. (Hokkanen 2015, 5; Kallioinen & Laaksonen 2016; 12.)

Dronella tehty kartoituslento noudattaa fotogrammetrian periaatteita (Helander 2015, 10). Tällä menetelmällä tehty kaukokartoitus on huomattavasti edullisempää kuin miehitetyllä lennolla tai satelliittikartoituksen menetelmin. Dronekuvauksen avulla saadaan tuotettua samankokoinen pistepilvi samasta kohteesta huomattavasti maalaserkeilausta nopeammin. (Teittinen 2017, 21, 29.)

3 Dronen käyttö metsätaloudessa

3.1 Metsätuhojen kartoitus

Viime vuosina metsien hyönteistuhojen määrä on lisääntynyt ilmaston lämpenemisen vuoksi. Talvehtivien tuhohyönteisten toukat ja munat kuolevat normaalin talven aikana, mutta lämpötilan kohottua suurin osa säilyy hengissä. Myös kasvukausi on Suomessa pidentynyt keväiden varhaistumisen vuoksi. Metsä, joka on stressaantunut tai vaurioitunut myrskyssä, altistuvat herkemmin tuhonaiheuttajille. Tuhohyönteiset lisääntyvät myös tehokkaasti ja hyönteissukupolvia saattaa kehittyä useampi vuodessa. Hyönteistuhoja saattaa seurata metsäpalot, sillä metsässä on runsaasti kuollutta ja kuivaa puustoa. (Lyytikäinen-Saarenmaa, Kantola, Blomqvist & Kosunen 2015, 36–37.)

Alttius myrskytuhoille kasvaa ilmaston lämpenemisen myötä. Maa on entistä lyhyemmän ajan talvesta roudassa, mikä heikentää puiden ankkuroitumista maahan ja kasvattaa tuhoriskiä. Mikäli juurikäpää on heikentänyt puiden juuristoja ja tyviä, on kaatumavaara suurempi. Talvien lyhentymisen ja roudan puuttumisen yhteisvaikutuksena ovat myrskytuhot talvella lisääntyneet. (Luonnonvarakeskus 2016; Pulkkinen 2020, 5.)

Metsätuhojen seurannassa käytetään kaukokartoituksen menetelmiä. Näiden menetelmien hyötyihin lukeutuu eri tuhojen varhaisoireiden havaitseminen sekä

puustossa esiintyvien oireiden laajuus, joita ei välttämättä pysty maastossa havainnoimaan. (Lyytikäinen-Saarenmaa ym 2015, 38.)

3.2 Taimikon hoitotarpeen kartoitus

Taimikoiden suhteen dronen käyttöä on tutkittu esimerkiksi Maaseutu 2.0 hankkeessa. Hankkeen tarkoituksena on ollut etsiä uusia tehokkaita tapoja tiedon hankintaan ja hyödyntämiseen maa- ja metsätaloudessa. Erityisenä hankkeen kohteena ovat taimikot, joissa niiden tilaa ja hoitotarpeen selvitystä on tehty dronekuvausten avulla. (Paananen 2017.)

Dronekuvauksista voitaisiin saada lisähyötyä taimikoiden maastoinventointiin, koska taimikoiden inventointityötä on tarve keventää. Huomioitavaa kuitenkin on, että kuvauksia ei kannata tehdä yksittäisissä taimikoissa, vaan kuvauksia tulisi suorittaa laajemmilla yhtenäisillä alueilla. Jotta työ olisi tehokasta kuvauttavan alueen tulisi olla kooltaan 10 - 100 ha. Koska lennot ja kuvaaminen vaativat valmisteluja, pienillä kohteilla maastoarvioinnin voi tehdä samassa ajassa. Selvät välitöntä hoitoa vaativat taimikot saadaan tunnistettua kuvausten perusteella parhaiten. (Paananen 2018.)

3.3 Työnjäljenseuranta

Taimikoiden osalta hoitotyön jälkeä pystytään dronekuvauksen avulla seuraamaan ja esimerkiksi jäljelle jäävän puuston runkoluku pystytään määrittämään. Käytännössä hoitotyön jälkeä ei ole kuitenkaan järkevää tarkastaa dronekuvauksen avulla, jos kyseessä on Kemera-kohde. Dronekuvauksen avulla ei pystytä toistaiseksi keräämään kaikkea Kemera tarkistuksessa tarvittavaa tietoa, esimerkiksi poistettujen runkojen määrää tai kantoläpimittaa. (Paananen 2018.)

Uudistushakkuun jälkeen pystytään dronekuvauksella tutkimaan säästöpuihin liittyvää tietoa. Puut pystytään paikallistamaan ja niistä saadaan laskettua korkeus, läpimitta sekä tilavuus. Dronekuvauksen avulla voitaisiin säästöpuuryhmän

sijoittelun oikeellisuutta arvioida vertaamalla toteutusta esimerkiksi kosteusindeksiin. Lisäksi säästöpuuryhmän sijainnista voitaisiin saada tarkempaa tietoa hakkuukoneiden tiedon avulla, kun koneen antamaa sijaintitietoa verrataan dronen tallentamaan sijaintiin. (Saaristo, Korhonen, Laitinen, Partanen, Pasanen, Punttila & Siitonen 2020, 7.)

3.4 Energiapuun mittaus

Dronen käyttöä on sovellettu energiapuuterminaalien inventointiin ja myös tämä inventointi perustuu fotogrammetrian käyttöön. Koska terminaaleissa pinossa olevan energiapuun mittaus miestyönä on hidasta ja aikaa vievää on työtä pyritty nopeuttamaan dronekuvauksen avulla. Dronekuvauksen avulla mitattujen pinojen kehystilavuuksissa ei ole huomioitu pinojen alus- ja välipuita, joten tämä joudutaan korjaamaan laskennassa pienemmällä kiintotilavuuskertoimella. (Kuosmanen 2019, 26–27.)

Vaikka mittaus on nopeampaa dronella kuvaten on mittaustulosten käsittelyn ajanmenekki huomattavasti suurempaa kuin perinteisessä mittauksessa. Perinteisessä mittauksessa terminaalin tulosten laskeminen vie noin 10 – 15 minuuttia ja se pystytään toteuttamaan tarvittaessa jo paikan päällä terminaalissa. Dronekuvauksen perusteella toteutetun mittauksen tulosten saaminen puolestaan vie muutamia päiviä. (Kuosmanen 2019, 26-27.)

3.5 Metsäluonnon monimuotoisuuden turvaaminen

Dronekuvauksen avulla voidaan edistää luontokohteiden turvaamista ja kohteiden käsittelyä pystytään seuraamaan tarkemmin. Kuvauksessa saadaan näkyviin esimerkiksi kalliot ja purot, kun taas osa luontokohteista on kuvilta hankalasti erotettavissa ja niiden toteaminen vaatii maastokäynnin. Metsänhoitotöiden rajoituksissa luontokohteiden suojavyöhykkeisiin voidaan suojavyöhykkeiden leveydet mitata luotettavasti ilmakuvilta. (Saaristo ym. 2020, 9-10.)

Dronekuvausten jälkeen kuvilta voidaan määrittää lahoppuuston määrä silmäva-
raisen tulkinnan avulla. Kuvilta pystytään erottamaan pystyyn kuolleet puut sekä
kuolleet maapuut. Kuvien perusteella pystytään määrittämään lahoppuun runkoti-
lavuus, mikäli puulaji on tiedossa. Kuolleen puun osalta dronen avulla tuotettua
tietoa pidetään yhtä tarkkana kuin maastossa kerättyä mittaustietoa. (Saaristo
ym. 2020, 8.)

4 Fotogrammetria metsävaratiedon tuottamisessa

4.1 Fotogrammetria

Fotogrammetria on tekniikka, jolla saadaan tuotettua luotettavaa tietoa fyysisistä
esineistä tai ympäristöstä tallentamalla, mittaamalla ja tulkitsemalla valokuvia.
Sen tärkein tehtävä on luotettavasti määrittää kuvan ja kohteen välinen geomet-
rinen suhde sellaisena, kuin se oli kuvanottohetkellä. Perinteisesti fotogrammet-
rialla on tutkittu kohteen muotoa ja ominaisuuksia ottamalla kohteesta kuvia ja
suorittamalla mittauksia niistä sen sijaan, että mitattaisiin itse kohdetta. Tekninen
kehitys on mahdollistanut sen, että fotogrammetrialla pystytään tutkimaan myös
muita sähkömagneettisen säteilyn tuottamia kuvia sekä digitaalista kuvamateri-
aalia. (Vinni 2003; Ahmad, Uddin & Goparaju 2018, 225.)

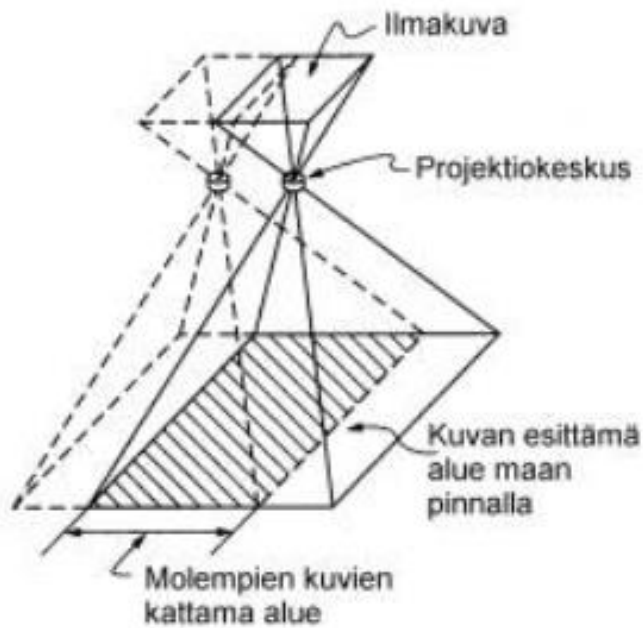
Fotogrammetrian toiminta perustuu matemaattisiin sääntöihin, joista tärkein on
kollineaarisuusehto. Tämän ehdon mukaan kohde, sen kuva valokuvalla ja ka-
meran projektiokeskus sijaitsevat samalla suoralla. Matematiikan kannalta on
helpoin ajatella kameran linssisysteemin tilalle yksi piste, jonka kautta kaikki fil-
mille tulevat valonsäteet kulkevat. Tämä piste on kameran projektiokeskus. (Vinni
2003.)

4.2 Fotogrammetria dronekuvauksessa

Dronella tehtävässä kaukokartoituksessa tärkein fotogrammetrinen toimenpide on kameran kalibrointi, joka voidaan suorittaa ennen tai jälkeen kuvausten. Kalibroinnissa määritellään kameravakion, pääpisteen paikan sekä optiikan aiheuttamia virheitä. Kalibroitiparametrien eli kameran geometriatietojen tulee olla tiedossa, ennen kuin kuvilta voidaan suorittaa minkäänlaista laskentaa, kuvien yhteensovitusta tai muodostaa ortokuvia tai malleja. (Teittinen 2017, 16.)

Ennen dronekuvauksen alkamista laaditaan dronelle lentosuunnitelma tietokoneen avulla. Lentosuunnitelmassa määritellään kuvattavan alueen suuruus sekä pituus- ja leveyssuunta. Tietokoneohjelma laskee automaattisesti kohdepisteet lentoreitille annettujen parametrien mukaisesti. Lentosuunnitelmassa tulee aina huomioida myös laukaisu- ja laskeutumisalue, jotta noususta tai laskeutumisesta ei aiheudu materiaalista vahinkoa laitteelle. (Helander 2015, 18.)

Alueen kuvauksessa on huomioitava, että kuvista tehtäviä mittauksia ei voida suorittaa yhden kuvan perusteella, vaan mittauksiin tarvitaan aina vähintään kaksi kuvaa. Yhdeltä kuvalta ei voida määrittää kohteen kolmiulotteista muotoa, sillä siitä ei voida mitata parallaksia. Fotogrammetriassa hyödynnetään stereokuvausta, jossa samalta suoralta otetaan kaksi valokuvaa hieman eri kohdista niin, että kuvilla näkyy osittain sama alue (kuva 1). Näin saadaan tuotettua kolmiulotteinen kuva, joka sisältää paljon enemmän informaatiota kuin tavallinen kuva. Kolmiulotteista kuvaa on myös helpompi ja luontevampi tulkita. (Vinni 2013.)



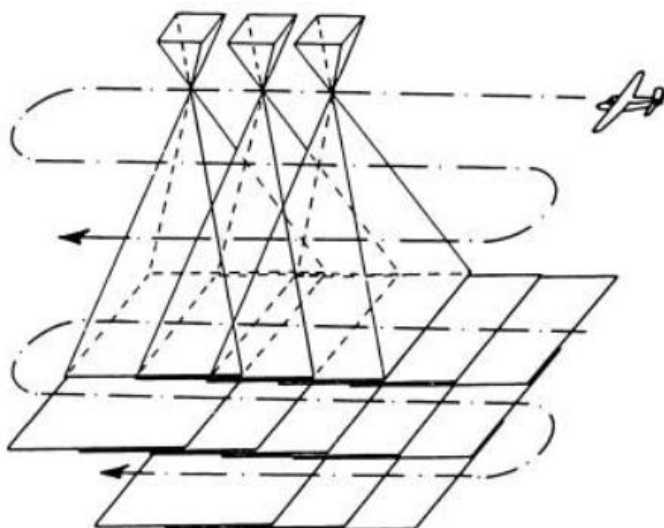
Kuva 1. Stereokuvauksen periaate (Vinni 2003).

Ilmakuvista maastokohteiden mittaamista varten tulee selvittää kuvien ja kohteiden välinen yhteys. On siis tarkasti määritettävä, missä asennossa ja missä paikassa kamera oli maastoon nähden jokaisen kuvan ottohetkellä. Kameran asennot ja sijainnit määritetään GPS-järjestelmän ja inertialaitteiden avulla. Tarvittaessa nämä tiedot voidaan määrittää myös kuvilta kerätyistä tiedoista. (Vinni 2013.)

4.3 Kuvien prosessointi

Dronekuvauksessa tuotettuja ilmakuvia on tarkoitus tarkastella stereoskooppisesti eli otettujen kuvien tulee muodostaa stereokuvapareja. Tämä saadaan aikaan, kun kartoitettavan alueen yli lennettäessä kamera laukaistaan tasaisin väliajoin niin, että jokainen kartoitettavan alueen kohta näkyy vähintään kahdella kuvalla. Jotta stereonäkymä saadaan muodostettua suuremmalta alueelta, otetaan useita peräkkäisiä kuvia, jotka menevät osittain päällekkäin. Näin saadaan muodostettua kuvista kuvajono. (Vinni 2013; Helander 2015, 19.)

Kun alueen yltä muodostetaan useita vierekkäisiä kuvajonoja, käytetään termiä kuvablokki (kuva 2). Jotta kuvablokki saadaan muodostettua, tulee jonojen mennä jonkin verran päällekkäin koko pituudeltaan. Käytännössä kuvablokin muodostaminen tapahtuu tietokoneohjelmaa apuna käyttäen suurimmilta osin automaattisesti. (Vinni 2013; Helander 2015, 19.)



Kuva 2. Kuvablokin muodostuminen (Vinni 2003).

Kuvablokin muodostamisen jälkeen ilmakuvat prosessoidaan jollain fotogrammetriaohjelmistolla. Ohjelmisto tunnistaa kuvilta pienen määrän yhteisiä pisteitä ja luo näiden pohjalta harvan pistepilven. Harvassa pistepilvessä pisteitä voi olla esimerkiksi 100 000. Tämän jälkeen ohjelmistolla rakennetaan tiheä pistepilvi, jossa voi olla kymmeniä miljoonia pisteitä halutun laadun mukaan. Tämän tiheän pistepilven avulla voidaan ohjelmistolla rakentaa korkeusmalli, DEM. (Korhonen & Kuivalainen 2019, 11–12.)

Jotta kuvia voidaan tulkita ja prosessoida eteenpäin, muutetaan ne keskusprojektiosta ortokuvaksi. Ortokuva tarkoittaa ilmakuvaa, josta on poistettu maaston korkeuseroista johtuvat mittakaavaerot, eli ortokuva vastaa projektioltaan kartta-projektiota. Ortokuvien muodostamiseksi tulee kuvattavalta alueelta olla olemassa korkeusmalli, jonka avulla kuville tehdään orto-oikaisu. Orto-oikaisussa korkeusmallia käytetään siis kuvien oikaisupintana. Tämä tarkoittaa sitä, että ortokuvissa kohteiden geometria on oikaistu vastaamaan karttaa, jolloin niistä voidaan mitata esimerkiksi pinta-aloja ja etäisyyksiä. Metsäinventoinnissa

ortokuvilta voidaan määrittää puiden latvuksien halkaisijat. (Kallioinen & Laaksonen 2016, 7; Korhonen & Kuivalainen 2019, 13.)

Puustotiedon tuottaminen lähtee liikkeelle yksittäisten puiden tunnistamisesta. Kun latvuksen halkaisija ja puun pituus on tiedossa, voidaan näiden perusteella määrittää arvio puun rinnankorkeusläpimitasta ja tilavuudesta erilaisia matemaattisia malleja apuna käyttäen. Myös puulaji määritetään tässä vaiheessa. Puustotiedot metsätalouskuvioille tuotetaan edellä mainitun yksinpuintulkintamenetelmän avulla. Puustotunnukset tuotetaan puulajikohtaisesti sekä kokonaispuustolle. (MHG Systems Oy Ltd 2018, 1–3.)

5 Tutkimuksen tavoite ja tarkoitus

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää fotogrammetrialla ja yksinpuintulkinnalla tuotetun puustotiedon luotettavuutta eri kehitysluokissa. Onko dronella otetuista ilmakuvista mahdollista tuottaa luotettavaa puustotietoa? Onko luotettavuus riippuvainen kehitysluokasta ja puulajista? Pystytäänkö näin tuotettua puustotietoa hyödyntämään sellaisenaan käytännön metsätaloudessa? Tarkoituksena on todentaa ilmakuvilta tuotetun puustotiedon paikkaansa pitävyys.

Tutkimus on tehty yhteistyössä Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjala Ry:n kanssa. Metsänhoitoyhdistykset ovat metsänomistajien yhdistyksiä ja etujärjestöjä, jotka valvovat metsänomistajien etuja. Metsänhoitoyhdistys tarjoaa erilaisia palveluita metsänomistajille, esimerkiksi puukauppaa ja metsänhoitoa. Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjala kattaa koko maakunnan sekä Uukuniemen alueen Etelä-Karjalassa. (Metsänomistajat Pohjois-Karjala 2020.)

6 Aineiston käsittely

Tutkimukseen valitut dronella kuvatut metsätilat saatiin tiedoksi Metsänhoitoyhdistykseltä. Tiloja koskevan puustotiedon on tuottanut MHG Systems Oy Ltd. Kuvaukset suoritettiin kesällä 2018. Tiloja oli kolme. Näiltä tiloilta valittiin mitattavat kuviot niin, että jokaista kehitysluokkaa saataisiin tutkimukseen jokaisesta pääpuulajista (mänty, kuusi ja koivu) kaksi kuviota. Käytännössä tämä ei kuitenkaan onnistunut, sillä jokaista kehitysluokkaa ei ollut tiloilla edustettuna. Mitattaville kuviolle luotiin koealaverkko, joka määräsi koealojen sijainnin maastossa (kuva 3). Koeala- ja linjavälinä käytettiin 50 - 100 metriä kuvion koosta riippuen. Tällä menetelmällä koealan sijainti määritettiin objektiivisesti. Koealoille navigoitiin GPS-paikantimen avulla.



Kuva 3. Koealojen sijainti kuviolla määritettiin etukäteen.

6.1 Maastomittaukset

Koealana käytettiin ympyräkoealaa, jonka säde on 9,77 metriä ja jonka edustama pinta-ala on 300 m². Poikkeuksena kehitysluokat T1 ja T2, joissa ympyräkoealan säteenä käytettiin 3,99 metriä, joka vastaa 50 m². Koealojen määrä kuviolla määräytyi pinta-alan mukaan taulukon 1 mukaisesti. Taulukon pohjana käytettiin

Metsäkeskuksen ensiharvennuksen laadunvalvonta ohjetta, jotta koealoja olisi kuviolla riittävästi tulosten tarkkuuden parantamiseksi.

Kuvion pinta-ala, ha	Mitattavia
< 1	3
1 - 1,9	5
2 - 3,9	6
4 - 5,9	7
6 - 7,9	8
8 - 9,9	9
10 +	10

Taulukko 1. Koealojen määrä kuvion pinta-alan mukaan (Metsäkeskus 2020).

9,77 metrin koealalta jokaisesta koealan sisään jäävä puu merkittiin lapulla, jotta mittaus oli helpompi toteuttaa (kuva 5). Mitatusta puusta lappu poistettiin, jotta tiedettiin, mitkä puut koealalla olivat vielä mittaamatta. Jokaisesta yksittäisestä rungosta mitattiin rinnankorkeusläpimitta ja pituus. Näiden tunnusten avulla laskettiin jokaiselle puulle tilavuus Laasasenahon tilavuusyhtälöitä käyttäen. Laskennasta on kerrottu tarkemmin opinnäytetyön seuraavassa luvussa.



Kuva 5. Mitattavat puut merkittiin lapuilla.

6.2 Puustotietojen laskenta

Taimikot mitattiin käyttämällä 3,99 metrin koealaa. Jokainen taimi koealalla laskettiin ja koska tulos oli saatava muodossa kappaletta hehtaarilla, kerrottiin taimimäärä koealakertoimella 200. Tämä tulos kirjattiin ylös puulajeittain. Koealalta mitattiin puulajeittain myös keskipituus ja rinnankorkeusläpimitta, mikäli keskipituus ylitti 1,3 metriä (taulukko 2). Koealoilta laskettiin puulajeittain keskiarvo, jolloin saatiin selville hehtaariohtainen tulos kuviolla (taulukko 3).

Koeala	mänty			Kuusi			Koivu		
	Rulu, kpl/ha	Pi-tuus,m	Lpm,cm	Rulu, kpl/ha	Pi-tuus,m	Lpm,cm	Rulu, kpl/ha	Pi-tuus,m	Lpm,cm
1	7200	3	4	0	0	0	0	0	0
2	6800	3	4,5	0	0	0	0	0	0
3	7200	3,5	1	0	0	0	400	4	3

Taulukko 2. Taimikon laskenta yhden koealan osalta.

keskiarvo kuviolla		
mänty/rulu/ha	kuusi/rulu/ha	koivu/rulu/ha
7067	0	133

Taulukko 3. Taimien kuviokohtainen määrä hehtaarilla.

Kehitysluokissa 02, 03 ja 04 rungon tilavuuden laskennassa käytettiin Laasasehän rinnankorkeusläpimittaan (d) ja pituuteen (h) perustuvia kahden parametrin malleja. Laskentakaava riippuu puulajista seuraavasti:

$$\text{Mänty } v=0,036089 \cdot d^{2,01395} \cdot (0,99676)^d \cdot h^{2,07025} \cdot (h-1,3)^{-1,07209}$$

$$\text{Kuusi } v=0,022927 \cdot d^{1,91505} \cdot (0,99146)^d \cdot h^{2,82541} \cdot (h-1,3)^{-1,53547}$$

$$\text{Koivu } v=0,011197 \cdot d^{2,10235} \cdot (0,98600)^d \cdot h^{3,98519} \cdot (h-1,3)^{-2,65900}$$

Näillä laskentakaavoilla laskennan keskivirheet ovat männyllä 7,2 %, kuusella 7,6 % ja koivulla 8,5 % (Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio 2008, 277).

Näin lasketut yksittäisten puiden tilavuudet saatiin desimetreinä, jotta aineistoa olisi helpompi käsitellä, muutettiin tilavuudet kuutiometreiksi. Eli saatu desimetri-tulos jaettiin 1000:lla. Koska tulos tarvittiin muodossa kuutiometriä hehtaarilla, tuli

yksittäisen puun tilavuus kertoa koealakertoimella, joka tässä tapauksessa oli 33,33. Edellisessä vaiheessa lasketut kuutiometrimäärät laskettiin puulajikohtaisesti koealoittain yhteen.

Kun puulajikohtaiset määrät olivat tiedossa koealoittain, saatiin kuviokohtainen kuutiometrimäärä hehtaarilla selville laskemalla jokaiselle puulajille keskiarvo. Alla olevassa taulukossa (taulukko 4) on yhden koealan valmiiksi saatu laskenta. Taulukossa 5 on saman kuvion kuviokohtainen puuston määrän hehtaarilla. Koska dronekuvausten perusteella tuotetussa kuviotiedossa ei ole eritelty koivun ja muiden lehtipuiden määrää, laskettiin maastossa mitatut määrät vertailua varten vielä yhteen.

Puu nro	Puulaji	Lpm, cm	Pi-tuus, m	dm ³	m ³	m ³ /ha	mä/m ³ /ha/koe-ala
1	mä	39,20	27,50	1479,53	1,48	49,31	212,77
2	mä	29,50	22,75	720,78	0,72	24,02	
3	mä	36,10	26,50	1222,52	1,22	40,75	
4	mä	25,80	23,50	574,07	0,57	19,13	
5	mä	30,40	24,50	818,34	0,82	27,28	
6	mä	34,50	26,00	1101,71	1,10	36,72	
7	mä	24,20	21,50	466,89	0,47	15,56	

Taulukko 4. Koealan laskenta uudistuskypsän metsikön osalta.

Keskiarvo kuviolla		
mä/m ³ /ha	ku/m ³ /ha	lehtipuu/m ³ /ha
226,98	0,00	0,20

Taulukko 5. Kuviokohtainen puuston määrä hehtaarilla.

Maastomittauksien ja ilmakuvien välistä eroa tarkasteltiin 95 %:n luottamusvälin avulla. Jotta tämä saatiin laskettua, tuli kuvioilta laskea myös koealojen keskihajonta puulajeittain (taulukko 6). Myös taimikoille laskettiin keskihajonta samalla menetelmällä.

keskihajonta kuviolla		
mä/m ³ /ha	ku/m ³ /ha	lehtipuu/m ³ /ha
35,47	0,00	0,50

Taulukko 6. Kuviokohtainen keskihajonta kuviolla.

6.3 Luottamusvälin laskenta

Kun puustotieto kuvioilla saatiin maastomittauksien perusteella laskettua, piti laskea vielä 95 %:n luottamusväli puulajeittain tulosten vertailua varten. Luottamusväli laskettiin kaikissa kehitysluokissa samalla tavalla.

Luottamusvälillä tarkoitetaan väliä, jolla perusjoukon suure tietyllä todennäköisyydellä sijaitsee, kun sitä arvioidaan otoksesta laskettujen arvojen perusteella. Luottamusvälin avulla mitataan virhearvioinnin todennäköisyyttä eri luottamustasoja käyttäen. Usein käytetään 95 %:n luottamustasoa, mikä tarkoittaa, että perusjoukon tunnusluku sijaitsee 95 %:n varmuudella ilmoitetulla luottamusvälillä. (Karjalainen 2004,189; Heikkilä 2008, 106–107.)

Perusjoukon odotusarvon luottamusväli 95 %:n luottamustasolla saadaan ala- ja yläraja laskettua kaavalla:

$$\left[\bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

jossa

\bar{x} on satunnaismuuttujan otoksesta laskettu otoskeskiarvo,

t on Studentin t-jakauman t-arvo,

s satunnaismuuttujan keskihajonta

n otoksen koko (Sullivan 2021).

Koska tutkimus on otoskooltaan pieni, ovat tulokset epäluotettavia. Tätä epäluotettavuutta saadaan korjattua käyttämällä Studentin t-jakaumaa. Sen määrittelemä matemaattinen lauseke määräytyy vapausasteen mukaan. Vapausasteen

arvo on yhtä pienempi kuin otoskoko, ja sen tarkoitus on kuvata, kuinka monta vapaata havaintoa aineistossa on. Vapausasteen vaihtuessa jakauman muotokin muuttuu. (Heikkilä 2008, 106.)

Luottamusvälin laskennassa 95 %:n luottamustasolla käytetään alfana eli p-arvona 0,05. Tämä luku ja vapausaste määrittävät Studentin t-jakauma taulukon arvon. Esimerkiksi otoskoon ollessa 6 vapausaste on 5. Edellä mainitulla alfalla saadaan Studentin t-jakauma taulukosta t-arvo 2,751 (kuva 6).

vapausaste- luku	$p = 0,20$ (20%)	$p = 0,10$ (10%)	$p = 0,05$ (5%)	$p = 0,025$ (2,5%)	$p = 0,01$ (1%)	$p = 0,001$ (0,1%)
1	3.078	6.314	12.706	25.452	63.656	636.578
2	1.886	2.920	4.303	6.205	9.925	31.600
3	1.638	2.353	3.182	4.177	5.841	12.924
4	1.533	2.132	2.776	3.495	4.604	8.610
5	1.476	2.015	2.571	3.163	4.032	6.869
6	1.440	1.943	2.447	2.969	3.707	5.959
7	1.415	1.895	2.365	2.841	3.499	5.408
8	1.397	1.860	2.306	2.752	3.355	5.041
9	1.383	1.833	2.262	2.685	3.250	4.781
10	1.372	1.812	2.228	2.634	3.169	4.587

Kuva 6. Studentin t-jakauma taulukko (Taulukkokirja verkossa 2021).

Jotta dronekuvausten avulla tuotettua puustotietoa voitaisiin pitää luotettavana, tulisi puuston määrän sattua luottamusvälin ala- ja ylärajan sisäpuolelle. Taulukossa 7 esitetään uudistuskypsän metsikön luottamusväli ala- ja ylärajoineen.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	189,75	0,00	-0,32
Yläraja	264,20	0,00	0,73
Vertailuaineisto, m ³ /ha	339,00	3,00	41,00
Maastomittaus, m ³ /ha	227,00	0,00	0,00

Taulukko 7. Uudistuskypsän metsikön luottamusväli yhdellä kuviolla.

7 Tulokset

Opinnäytetyössä tarkasteltiin tuloksia kehitysluokittain eri puulajeissa, joista tarkasteltavana olivat mänty, kuusi ja koivu. Koska dronekuvauksen perusteella tuotetussa puustotiedossa ei koivun määrää oltu erikseen määritelty, tarkasteltiin sitä yhteismääränä muiden lehtipuiden kanssa.

7.1 Kehitysluokat T1 ja T2

Koska tutkimukseen valikoiduilla tiloilla ei ollut yhtään kuviota kehitysluokassa T1, jäi se näin ollen tutkimuksen ulkopuolelle. Kehitysluokassa T2 saatiin tulokset tuotettua pääpuulajiltaan mänty- ja kuusitaimikoihin.

Kehitysluokassa T2 pääpuulajin ollessa kuusi ei dronekuvauksen perusteella tuotettu puustotieto pidä paikkaansa. Tarkistusmitatuilla kuvioilla näiden kuvausten perusteella saatu kuusen runkoluku ei satu 95 % luottamusvälin ala- ja ylärajan sisään. Männyn runkoluku tällaisilla kuvioilla on tilastollisesti luotettava. Lehtipuun runkoluku puolestaan ei ole luotettava. Taimikoiden osalta fotogrammetrialla tuotettu runkoluku on huomattavasti alhaisempi kuin todellinen maastossa mitattu runkoluku. Taulukossa 8 on esimerkki erään T2 kuusikon tuloksista ja siitä on selvästi havaittavissa dronekuvauksen perusteella tuotetun ja maastossa mitatun puustotiedon ero.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	-173,99	1381,69	3842,56
Yläaraja	773,99	2018,31	18290,77
Vertailuaineisto, rulu/ha	73,00	0,00	99,00
Maastomittaus, rulu/ha	300,00	1700,00	11066,00

Taulukko 8. Tulokset pääpuulajin ollessa kuusi.

Pääpuulajin ollessa mänty ei fotogrammetrian perusteella tuotettu puustotietoa voida pitää tilastollisesti luotettavana männyn ja kuusen osalta. Lehtipuun osalta luotettavuuteen vaikuttaa se, onko kuvion lehtipuusto koivua vai sisältääkö se

myös muita puulajeja. Lehtipuuston ollessa koivua voidaan puustotietoa pitää tilastollisesti luotettavana. Kun taas lehtipuuston koostuessa useammasta puulajista puustotietoa ei voida pitää luotettavana (taulukot 9 ja 10).

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	1102,60	1268,88	3142,76
Yläraja	2657,40	2171,12	8777,24
Vertailuaineisto, rulu/ha	45,00	4,00	7,00
Maastomittaus, rulu/ha	1880,00	1720,00	5960,00

Taulukko 9. Tulokset taimikoissa, joissa pääpuulajina on mänty ja lehtipuusto koostuu useasta puulajista.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	6492,98	0,00	-440,35
Yläraja	7640,35	0,00	707,02
Vertailuaineisto, rulu/ha	32,00	0,00	37,00
Maastomittaus, rulu/ha	7067,00	0,00	133,00

Taulukko 10. Tulokset taimikoissa, joissa pääpuulajina on mänty ja lehtipuusto on koivua.

7.2 Kehitysluokat 02, 03 ja 04

Kehitysluokassa 02 pääpuulajin ollessa kuusi ei dronekuvauksen perusteella tuotettu puustotieto pääpuulajin osalta ole tilastollisesti luotettava. Maastossa suoritettuun tarkastusmittaukseen verrattuna kuvista laskettu kuusen määrä poikkeaa huomattavasti (taulukko 11). Myöskään männyn määrää tällaisilla kuvioilla ei voida pitää luotettavana. Tutkimuksen perusteella lehtipuun määrä kuusikoissa on luotettava.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	-1,31	154,74	9,98
Yläraja	4,38	253,19	44,71
Vertailuaineisto, m ³ /ha	8,00	97,00	22,00
Maastomittaus, m ³ /ha	2,00	204,00	27,00

Taulukko 11. Tulokset, kun pääpuulaji on kuusi.

Pääpuulajin ollessa mänty ei tämän tutkimuksen perusteella voida todeta puusotiedon luotettavuutta varmaksi. Koska kyseessä on tapaustutkimus, oli mitattavia kuvioita männyn osalta vain kaksi. Toisella kuviolla männyn määrä on tilastollisesti luotettava ja toisella kuviolla ei (taulukot 12 ja 13). Myös kuusen ja lehtipuun osalta tilanne on tällaisella kuviolla sama.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	34,00	-0,55	9,22
Yläraja	131,64	3,39	69,64
Vertailuaineisto, m ³ /ha	48,00	19,00	31,00
Maastomittaus, m ³ /ha	83,00	1,00	39,00

Taulukko 12. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	103,80	-1,17	-1,27
Yläraja	133,00	2,66	9,15
Vertailuaineisto, m ³ /ha	51,00	3,00	20,00
Maastomittaus, m ³ /ha	118,00	1,00	4,00

Taulukko 13. Tilastollisesti epäluotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

Pääpuulajin ollessa hies- tai rauduskoivu luotettavuutta ei pystytä tilastollisesti todentamaan. Myös näiden puulajien osalta ongelmaksi muodostuu tutkimuksen pieni otos. Tutkittavista kuvioista toisen osalta koivun määrää voitiin pitää tilastollisesti luotettavana, kun taas toisen kuvion osalta tulosta ei voida pitää luotettavana (taulukot 14 ja 15). Myöskään männyn ja kuusen määrän luotettavuutta koivikoissa ei voida tämän tutkimuksen perusteella tilastollisesti todentaa.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	-34,25	-3,53	-9,98
Yläraja	73,54	9,57	76,78
Vertailuaineisto, m ³ /ha	42,00	2,00	50,00
Maastomittaus, m ³ /ha	20,00	3,00	33,00

Taulukko 14. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset koivikossa.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	0,00	-1,75	93,85
Yläraja	0,00	3,98	131,31
Vertailuaineisto, m ³ /ha	27,00	101,00	74,00
Maastomittaus, m ³ /ha	0,00	1,00	66,00

Taulukko 15. Tilastollisesti epäluotettavana pidettävän kuvion tulokset koivikossa.

Kehitysluokassa 03 pääpuulajin ollessa kuusi ei tämän tutkimuksen perusteella pystytä todentamaan dronekuvauksen avulla tuotetun puustotiedon tilastollista luotettavuutta kuusen osalta. Ongelmaksi myös tässä kehitysluokassa muodostui tutkimuksen pieni otos. Toisella kuviolla kuusen määrä on tilastollisesti luotettava ja toisella kuviolla ei ole (taulukot 16 ja 17). Myöskään männyn määrän luotettavuutta kuusikoissa ei voida tämän tutkimuksen perusteella todentaa. Lehtipuun määrä kuusikoissa ei tämän tutkimuksen perusteella ole tilastollisesti luotettavaa.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	-16,23	-25,14	37,42
Yläraja	33,55	234,34	111,02
Vertailuaineisto, m ³ /ha	68,00	116,00	134,00
Maastomittaus, m ³ /ha	9,00	105,00	74,00

Taulukko 16. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset kuusikossa.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	0,00	130,90	-3,94
Yläraja	0,00	364,49	16,96
Vertailuaineisto, m ³ /ha	81,00	78,00	50,00
Maastomittaus, m ³ /ha	0,00	248,00	7,00

Taulukko 17. Tilastollisesti epäluotettavana pidettävän kuvion tulokset kuusikossa.

Pääpuulajin ollessa mänty, dronekuvauksen perusteella tuotettua puustotietoa voidaan pitää tilastollisesti luotettavana männyn osalta. Männiköissä kuusen ja lehtipuun määrää ei voida tämän tutkimuksen perusteella todentaa luotettavaksi tai epäluotettavaksi. Tutkimukseen valituista kuvioista toisella kuusen ja lehtipuun määrä oli tilastollisesti luotettavaa ja toisella kuviolla tilastollisesti epäluotettavaa (taulukot 18 ja 19).

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	57,92	6,90	-12,50
Yläraja	232,45	25,30	51,80
Vertailuaineisto, m ³ /ha	150,00	11,00	5,00
Maastomittaus, m ³ /ha	145,00	16,00	19,00

Taulukko 18. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	135,40	0,00	-3,94
Yläraja	235,83	0,00	16,86
Vertailuaineisto, m ³ /ha	185,00	13,00	152,00
Maastomittaus, m ³ /ha	185,00	0,00	6,00

Taulukko 19. Tilastollisesti epäluotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

Kehitysluokassa 03 tutkimusta varten valituilla tiloilla pääpuulajiltaan hies- tai rauduskoivua olevia kuvioita ei juuri ollut. Tämän vuoksi tässä tutkimuksessa saatiin mitattua vain yksi koivikko kyseisessä kehitysluokassa. Tutkimuksen perusteella dronekuvauksen pohjalta tuotettua puustotietoa voidaan koivun osalta pitää tilastollisesti luotettavana (taulukko 20). Myös männyn määrää koivikossa voidaan tämän tutkimuksen perusteella pitää luotettavana. Männyn suuri määrä kuviolla johtui runkojen järeydestä. Kuusen osalta ei puuston määrä tämän tutkimuksen perusteella ole tilastollisesti luotettavaa.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	-21,84	-0,55	49,97
Yläraja	412,30	1,74	260,50
Vertailuaineisto, m ³ /ha	78,00	47,00	88,00
Maastomittaus, m ³ /ha	195,00	1,00	155,00

Taulukko 20. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset koivikossa.

Kehitysluokassa 04 tutkimukseen valituilta tiloilta saatiin mitattua vain pääpuulajiltaan mäntyä olevat kuviot, koska pääpuulajiltaan kuusta ja koivua olevia kuvioita ei ollut. Tämän tutkimuksen perusteella dronekuvauksen avulla tuotetun puustotiedon luotettavuutta männiköissä ei pystytty luotettavasti todentamaan pienen otoksen vuoksi. Toisella kuviolla männyn määrää voidaan pitää tilastollisesti luotettavana, kun taas toisella kuviolla ei sitä voida pitää luotettavana (taulukot 21 ja 22). Maastossa tehtyjen tarkistusmittausten ja ilmakuvilta tuotetun

puustotiedon ero männyn osalta on huomattava. Kuusen ja lehtipuun määrä tässä kehitysluokassa ei tämän tutkimuksen perusteella ole tilastollisesti luotettava.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	123,12	0,00	0,00
Yläraja	380,42	0,00	0,00
Vertailuaineisto, m ³ /ha	325,00	18,00	172,00
Maastomittaus, m ³ /ha	252,00	0,00	0,00

Taulukko 21. Tilastollisesti luotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

	Mänty	Kuusi	Lehtipuu
Alaraja	189,75	0,00	-0,32
Yläraja	264,20	0,00	0,73
Vertailuaineisto, m ³ /ha	339,00	3,00	41,00
Maastomittaus, m ³ /ha	227,00	0,00	0,00

Taulukko 22. Tilastollisesti epäluotettavana pidettävän kuvion tulokset männikössä.

8 Pohdinta

Tämä opinnäytetyö oli aiheena kiinnostava ja onnistui hyvin. Sen tekemiseen liittyi kuitenkin myös haasteita. Koska tutkimukseen otettiin mukaan kuvioita useasta kehitysluokasta, jäi otos jokaisen kehitysluokan kohdalla pieneksi. Otoksen pieni koko sekä kuvauksen ja mittauksen välissä kulunut aika vaikutti tutkimustuloksien luotettavuuteen. Mikäli tutkimuksessa olisi keskitytty vain yhteen kehitysluokkaan, olisi mittauksia saatu suoritettua enemmän ja tutkimustulos olisi luotettavampi. Tutkimus olisi ollut mielenkiintoista suorittaa laajempaan, mutta näillä resursseilla se ei ollut mahdollista. Sillä mittaustyö vei runsaasti aikaa ja mitattavia runkoja oli paljon. Mahdolliset jatkotutkimukset kannattaisi suorittaa vain yhdessä kehitysluokassa kerrallaan.

8.1 Tulosten tarkastelu

Tuloksia tarkasteltaessa oletetaan, että maastoinventoinneilla saadut tulokset ovat oikeita tuloksia, joihin fotogrammetrialla tuotettua aineistoa verrataan. Todellisuudessa maastossa inventoidut puustomäärät eivät kuitenkaan ole koskaan täysin tarkkoja. Tämän tutkimuksen perusteella dronekuvauksen perusteella tuotettua puustotietoa ei voida sellaisenaan hyödyntää metsätalouden käytännön työssä.

Kehitysluokassa T2 fotogrammetrialla tuotettua puustotietoa ei voida hyödyntää, vaikka tilastollisesti puustotieto olisi luotettavaa. Ilmakuvilta laskettu runkoluku ei ole realistinen käytännön metsätalouden kannalta tarkasteltuna. Esimerkiksi toisella kuviolla pääpuulajin ollessa mänty, oli sen runkoluvuksi saatu 45 runkoa hehtaarilla. Tämä ei voi pitää paikkaansa, sillä uudistamisvaiheessa mäntytaimikko perustetaan runkoluvultaan 2000 - 2500 taimen tiheyteen (Metsäteho Oy 2001, 12).

Kehitysluokassa 02 männyn ja koivun osalta luotettavuutta ei voitu tilastollisesti todentaa. Kuusen määrää kuvioilla ei voitu pitää tilastollisesti luotettavana. Käytännön metsätalouden kannalta kuvilta laskettuja puustotietoja ei tämän tutkimuksen perusteella voida hyödyntää. Ero maastossa tehdyissä tarkastusmittauksissa todennetulla puumäärällä ja kuvilta lasketulla puuston määrällä on huomattava.

Kehitysluokassa 03 pääpuulajin ollessa mänty, voidaan kuvilta laskettua puuston määrää pitää luotettavana männyn osalta. Vaikka tämä tieto on luotettavaa, ei sitä sellaisenaan pysty hyödyntämään käytännön työssä, sillä puuston määrä muiden puulajien osalta on tarkastettava maastossa. Huomioitavaa on myös se, että kuvauksen ja tarkastusmittausten välissä on kaksi kasvukautta. Koska tämän tutkimuksen perusteella kuusikoissa ja koivikoissa luotettavuutta ei pystytä todentamaan on tiedon käyttö käytännön työssä mahdotonta.

Kehitysluokassa 04 ei voitu tässä tutkimuksessa puuston määrää todentaa luotettavaksi. Koska kuvilta lasketun ja maastossa mitatun puuston määrän erotus on lähes 100 kuutiometriä hehtaarilla, ei tähän tietoon voi käytännön työssä luottaa.

Tuloksia tarkasteltaessa todettiin osalla kuvioista huomattavia eroja lehtipuun määrässä havupuuvaltaisissa metsiköissä. Ilmakuvilta tuotetun puustotiedon mukaan lehtipuuta olisi pitänyt parhaimmillaan olla jopa 170 m³/ha, kun todellisuudessa maastomittauksen perusteella sitä ei ollut lainkaan. Mikä aiheuttaa näin suuren tulkintavirheen?

Tämän tutkimuksen perusteella LiDAR-aineistoa voidaan pitää fotogrammetrian avulla tapahtuvaa yksinpuinlukua luotettavampana. Esimerkiksi puulajitulkinnassa päästään havumetsäalueella kolmella puulajilla (mänty, kuusi, lehtipu) jopa 90-95 %:n tarkkuuteen. Tällöin laserkeilausaineisto on ollut korkeapulssinen. Monijaksoisissa metsiköissä pienemmällä pulssitiheydellä saadut tulokset ovat olleet tarkkuudeltaan 75-85 %. Myös puista saatu pituustieto on fotogrammetrian menetelmin tuotettuna epätarkempaa. (Hyypä ym. 2009, 363-364.)

8.2 Tutkimuksen luotettavuus

Tämän tutkimuksen perusteella dronella tehdyn ilmakuvauksen avulla tuotettua puustotietoa ei voida pitää luotettavana. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin otettava huomioon tutkimusotoksen pieni koko, joka aiheuttaa epäluotettavuutta lopullisiin tuloksiin. Epäluotettavuutta tuloksissa aiheuttaa myös ilmakuvauksen ja maastomittauksen välissä kulunut aika. Tutkimuksen maastomittaukset tehtiin kaksi vuotta ilmakuvauksen jälkeen. Tämän vuoksi tutkimustulos ei ole yhtä luotettava, kuin jos maastomittaukset olisi suoritettu samana vuonna. Puuston kasvua tämän kahden vuoden aikana ei ole huomioitu maastomittauksissa. Jotta puuston kasvu olisi saatu huomioitua, olisi pituuskasvun lisäksi pitänyt selvittää läpimitan muutos. Tämä olisi vaatinut puiden kairaamista. Koska toimittiin usean yksityisen metsänomistajan tiloilla, olisi kairaamiseen tarvittu jokaiselta lupa.

Kairattavia puita olisi ollut todella paljon, mikä olisi lisännyt myös työmäärää huomattavasti.

Tämän tutkimuksen tuloksiin vaikuttaa myös tutkimuksessa käytetty kuvauskalusto ja laskentaohjelmisto. Näitä tullaan kehittämään paremmiksi ja toimivimmiksi tulevaisuudessa, jolloin myös vastaavanlaisen tutkimuksen tulokset ovat erilaiset. Kehityksen myötä fotogrammetrian ja yksinpuintulkinnan avulla tuotettu puustotieto tulee olemaan tarkempaa ja luotettavampaa.

8.3 Jatkokehitysehdotukset

Tämän tutkimuksen perusteella fotogrammetrian ja yksinpuintulkinnan avulla tuotetun puustotiedon luotettavuutta kannattaisi tutkia lisää, sillä kuvaustekniikka ja -kalusto on kehittynyt toteutetun kuvauksen jälkeen. Mikäli tämä tutkimus uusittaisiin uudemmalla kuvausaineistolla tuotettuun puustotietoon verraten, olisi tulos todennäköisesti hyvin erilainen. Jos myös uudella tekniikalla taimikoissa tulokset eivät ole parantuneet, kannattaisi ne jättää tutkimuksen ulkopuolelle. Tämän tutkimuksen perusteella paras luotettavuus saatiin 03 kehitysluokan männiköissä. Voisi olla mielenkiintoista tutkia miksi luotettavuus 04 kehitysluokan männiköissä ei ole yhtä hyvä.

Lähteet

- Auvinen, P. 1997. Metsänmittaus. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Ahmad, F., Uddin, M. & Goparaju, L. 2018. 3D Mapping by Photogrammetry and LiDAR in Forest Studies. World Scientific News. <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2018/02/WSN-95-2018-224-234-1.pdf>. 5.12.2020.
- Heikkilä, T. 2008. Tilastollinen tutkimus. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Helander, I. 2015. UAV:n avulla tuotetun fotogrammetrisen pistepilven vertailu ja käytettävyys. Opinnäytetyö. Lapin AMK. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015052811054>. 4.10.2019.
- Hokkanen, J. 2015. UAV-pistepilven tarkkuus. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201505219498>. 4.10.2019.
- Holopainen, M. 2019. Metsien kaukokartoitus – digitalisaatiota, täsmämetsätaloutta ja 4D-geoinformatiikkaa. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10214. Suomen Metsätieteellinen Seura.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5.
- Hyyppä, J., Holopainen, M., Vastaranta, M. & Puttonen, E. 2009. Yksittäisten puiden mittaus ja muutosten seuranta laserkeilauksella. Metsätieteen aikakauskirja.4/2009.
- Illman, J. & Pökälä, J. 2014. Laserpisteaineiston ja kuvio- sekä koealakohtaisten maastomittausten vertailu Evon opetusmetsän alueella. Opinnäytetyö. Hämeen Ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201403102986>. 5.12.2020.
- Juntunen, J. 2016. Metsävaratiedon hyödyntäminen Metsä Groupin sähköisissä asiakaspalveluissa. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201602092030>. 4.10.2019.
- Kallioinen, V. & Laaksonen, L. 2016. Metsän UAV-ilmakuvaus. Toteutus ja pintamallien laatiminen. Opinnäytetyö. Hämeen Ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201604184499>. 4.10.2019.
- Kangas, A., Haara, A., Holopainen, M., Luoma, V., Packalen, P., Packalen, T., Ruotsalainen, R. & Saarinen, N. 2019. Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyötyanalyysi. MetKu-hankkeen loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2019. Luonnonvarakeskus. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-707-7>. 1.3.2021
- Karjalainen, L. 2004. Tilastomatematiikka. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.
- Koivunen, V. 2020. Satelliitilla ja droonilla tehtävän kaukokartoituksen vertailu lohkon kasvillisuusindeksin määrittämisessä ja hyödyntämisessä. Maisterintutkielma. Helsingin yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202006052581>. 22.01.2021.
- Korhonen, L. & Kuivalainen, K. 2019. Fotogrammetrinen metsänmittausmenetelmä. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019091918925>. 16.10.2019.
- Kuosmanen, E. 2019. Pilottihanke Vapon energiapuuterminaalien inventoinnista droonin avulla. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019121326579>. 26.1.2021.

- Luonnonvarakeskus. 2016. Ilmastonmuutoksen vaikutus metsien vieraslaji-, tuho- ja tautiriskeihin. <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsat-ja-ilmastonmuutos/ilmastonmuutoksen-vaikutus-metsien-vieraslaji-tuho-ja-tautiriskeihin/>. 22.01.2021.
- Luonnonvarakeskus. 2015. Valtakunnan metsien inventointi (VMI). <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/info.htm>. 25.2.2021.
- Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Kantola, T., Blomqvist, M. & Kosunen, M. 2015. Hyönteistuhoriskien hallinta uusilla teknologioilla. Metsätieteen aikakauskirja 1/2015.
- MHG Systems Oy Ltd. 2018. Liite 1. UAV – Yksinpuin inventointipalvelun sisältö (MVP).
- Minguet, A. 2013. Vanhan kuviotietoaineiston käyttö laserkeilausperusteisen metsien inventoinnin aputietolähteenä. Opinnäytetyö. Karelia-ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201302082200> 1.10.2019.
- Metsänomistajat Pohjois-Karjala 2020. Pohjois-Karjala: Yhdistyksen esittely. <https://www.mhy.fi/pohjois-karjala/esittely>. 28.12.2020.
- Metsäkeskus. 2020. Ensiharvennuksen omavalvontaohje. <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/lomake-omavalvonta-ensiharvennuhje.pdf>. 5.12.2020.
- Metsäkeskus. 2016. Metsätiedon ajantasaisuus. <https://www.metsakeskus.fi/metsatiedon-ajantasaistus#.VNIC8k1EiAg>. 25.2.2021.
- Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 2008. Tapion taskukirja. Metsäkustannus Oy. Hämeenlinna.2008.
- Metsäteho Oy. 2001. Metsänviljelyopas. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2001/01/Metsanviljelyopas.pdf>. 8.2.2021.
- Paananen, R. 2017. Dronit metsätiedon keruussa. Uuden teknologian mahdollisuudet puunhankinnassa – seminaari. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raito_Paananen_Metsakeskus.pdf. 21.01.2021.
- Paananen, R. 2018. Drone-kuvausten käyttökelpoisuudesta metsäkeskuksen toiminnassa. Maaseutu 2.0 loppuseminaari. https://www.aitomaa-seutu.fi/media/Maaseutu_loppuseminaari_Paananen_2018_01_24.pdf. 21.01.2021.
- Pulkkinen, S. Kirjanpainajatuhojen kartoitus multispektrikameralla. 2020. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202002102246>. 22.01.2020.
- Saaristo, L., Korhonen, K., Laitinen, J., Partanen, J., Pasanen, H., Punntila, P. & Siitonen, J. 2020. Kustannustehokas luonnonhoidon laadun seurantatiedon kerääminen. Tapio Oy. <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/01/Kustannustehokas-luonnonhoidon-laadun-seurantatiedon-kerääminen.pdf>. 26.1.2021.
- Sullivan, L. 2021. Confidence intervalls. Boston University School of Public Health. https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_confidence_intervals/bs704_confidence_intervals_print.html. 23.2.2021.
- Taulukkokirja verkossa. 2021. Taulukot.com. <https://www.taulukot.com/matematiikka/normaalijakauma/>. 23.2.2021.
- Teittinen, H. 2017. Georeferoidun pistepilven tuottaminen miehittämättömällä lentoaluksella kerätystä kuva-aineistosta. Diplomityö. Aalto-yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201704133594>. 11.10.2019.

- Vinni, P. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – mitä on fotogrammetria? <http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>.
9.10.2019.
- Vuoti, J. 2017. Fotodiodivahvistimen suunnittelu ja toteutus. Opinnäytetyö. Turku AMK. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017121821748>.
1.10.2019.