Tampereen ammattikorkeakoulu

Drone-mittauksen tarkkuus ja sen kehittäminen kuitupuuvarastojen inventoinnissa

Ville-Albert Tikka

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2022

Metsätalouden tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Metsätalouden tutkinto-ohjelma

TIKKA, VILLE-ALBERT:
Drone-mittauksen tarkkuus ja sen kehittäminen kuitupuuvarastojen inventoinnissa

Opinnäytetyö 44 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Toukokuu 2022

UPM Kaukaan tehdasintegraatin kuitupuuvarastojen kokoa valvotaan kuukausittaisissa inventoinneissa. Inventoinnissa on otettu käyttöön fotogrammetriaan perustuva mittausmenetelmä, jossa varastoalueen kuitupuupinomuodostelmat ilmakuvataan kauko-ohjattavalla dronella. Käsittelemällä kuva-aineistoa mallinnusohjelmistossa pinoista saadaan mitattua pinojen kehystilavuus. Kertomalla kehystilavuus yleisellä pinokuutiokertoimella saadaan lopputulokseksi pinojen kiintotilavuus. Opinnäytetyössä tutkittiin fotogrammetrisen mittausmenetelmän tarkkuutta sekä kartoitettiin sen kehitystarpeita.

Drone-menetelmän on havaittu tuottavan todellista kiintokuutiomäärää suurempia arvioita pinojen tilavuuksista. Mittaustuloksen virheellisyyden epäillään johtuvan pinokuutiokertoimen epätarkkuudesta sekä pinojen väleihin jäävän tyhjän tilan vaikutuksesta. Opinnäytetyössä tutkittiin mittaustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä sekä käytiin läpi kehitysideoita tarkkuuden parantamiseksi. Tavoitteena oli muodostaa uusi kiintotilavuuden laskennassa käytettävä pinokuutiokerroin.

Tutkimus toteutettiin koejärjestelyin mittaamalla ennalta tunnettuja kuitupuueriä drone-menetelmällä. Kuitupinoja mitattiin erilaisissa pinomuodostelmissa, joissa tarkasteltiin pinovälien vaikutusta kehystilavuuteen. Drone-mittauksen tuloksia verrattiin paino-otantamenetelmän sekä perinteisen pinomittausmenetelmän tuottamiin tuloksiin. Drone-mittaus tuotti keskimäärin 9 % paino-otantamittausta pienemmän arvion koepinojen kiintotilavuudesta. Drone-menetelmä arvioi koepinojen kehystilauuden keskimäärin 20 % pinomittauksen arviota suuremmaksi.

Tuloksien tarkastelussa havaittiin, että fotogrammetrinen mittausmenetelmä kaipaa vielä kehitystyötä nykyisten rajoitteiden hiomiseksi. Merkittävin kehitystä kaipaava alue on paikannuksen tarkkuus. Drone-inventoinnissa päästään tarkempiin tuloksiin hyödyntämällä mittauksessa RTK-satelliittipaikannusta sekä maastotukipisteitä georeferoinnissa. Drone-menetelmän rajoitteista huolimatta se on todettu käyttökelpoiseksi menetelmäksi kuitupuuvarastojen inventoinnissa. Koemittausten rajallisen lukumäärän vuoksi tuloksista ei voida vetää perustavanlaatuisia johtopäätöksiä. Kiintotilavuuden laskennassa käytettävän yleistettävän pinokuutiokertoimen luominen edellyttää jatkotutkimuksia suuremmalla otoskoolla.

Asiasanat: fotogrammetria, drone, pinomittaus, metsätalous

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Forestry

TIKKA, VILLE-ALBERT:
Accuracy of Drone Measuring and Its Development in Inventory of Pulpwood Stocks

Bachelor's thesis 44 pages, appendices 5 pages
May 2022

The Volume of pulpwood storages of UPM Kaukas mill are monitored in monthly inventories. UPM has implemented a new photogrammetry-based method for the inventory, where the pulpwood stack formations are captured in aerial photography using a remotely controlled drone. The images are processed in photogrammetry software and converted into point cloud from which the gross volume the pulp stacks can be measured. The net volume is calculated by multiplying the gross volume by a standard conversion factor. This thesis studies the accuracy of the photogrammetric method and its developmental needs.

It's a known problem that the drone method tends to over-estimate the net volume of the pulpwood stacks. Reasons for this error is suspected to be caused by several factors: by using an inaccurate conversion factor when calculating the net volume and by the gaps between the pulpwood piles. This thesis explores the factors causing the measurement error and surveys the potential ways to improve the accuracy. One objective is to form a new conversion factor to be used in net volume calculation.

The research was conducted by measuring pre-selected pulpwood shipments using the drone method. Pulp stacks were measured in different stack formations to study the effects of the gaps between the stacks to the gross volume. Results of the drone-measurements were compared to results yielded by weight sampling and manual stack measuring methods. Drone method estimated the net volume of the pulp stacks an average of 9 % lower compared to the weight sampling method. The drone method yielded the gross volume of the pulp stacks an average of 20% higher than stack measurement method.

It was observed that the photogrammetric measuring method requires further development for patching out its defects. The most significant area in need of improvement is the accuracy of positioning. The accuracy of measurements can be increased by using RTK navigation system in positioning and ground control points in georeferencing. Despite its current limitations, the drone method has been found to be a serviceable method in the inventory of pulpwood stacks. Due to the limited number of measurement samples, no fundamental conclusions can be made based on the results of this study. Forming a standardized conversion factor for net volume calculation requires further studies with larger sample sizes.

Key words: photogrammetry, drone, stack measurement, forestry

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 7
2 PUUTAVARAN MITTAUS 9
2.1 Yleistä kuitupuun mittauksesta 9
2.2 Kuitupuun pinomittaus 10
2.2.1 Pinomittaus yleisesti 10
2.2.2 Pinon pituus 10
2.2.3 Pinon korkeus 11
2.2.4 Pinon leveys 12
2.2.5 Pinon kehystilavuus 12
2.2.6 Kiintotilavuusprosentti 13
2.2.7 Kiintotilavuuden laskenta 16
2.3 Paino-otantamittaus 16
3 DRONEMITTAUS 19
3.1 Yleistietoa droneista 19
3.2 Dronejen luokittelu 19
3.3 Droneihin liittyvät säädökset ja rajoitukset 20
3.4 Tutkimuksessa käytetyn dronen ominaisuudet 20
3.5 Fotogrammetria 21
3.6 Ground Sampling Distance 23
3.7 Kuukausi-inventointi Kaukaalla 24
4 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS 26
4.1 Tutkimusmenetelmä 26
4.2 Mittausjärjestelyt 26
4.3 Aineiston käsittely 29
5 TULOKSET 30
5.1 Drone-mittauksen tulokset 30
5.2 Pinomittauksen tulokset 31
5.3 Keskimääräinen pinokuutiokerroin 32
5.4 Havaintoja mittauksista 32
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITTÄMISIDEAT 35
6.1 Johtopäätökset 35
6.2 Kehittämisideoita 36
LÄHTEET 38
LIITTEET 40
Liite 1. STK-1036 koepuuerä esitettynä ortokuvassa. 40
Liite 2. STK-1016 koepuuerä esitettynä ortokuvassa. 41

Liite 3. 1769 Silva koepuuerä esitettynä ortokuvassa. 42
Liite 4. STK-1009 koepuuerä esitettynä ortokuvassa. 43
Liite 5. 9283 Lettland koepuuerä esitettynä ortokuvassa. 44

LYHENTEET JA TERMIT

GCP	Ground Control Point
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground Sampling Distance
Kehystilavuus	Puutavarapinon pituuden, leveyden ja korkeuden mukaan määritetty tilavuus
Kiintotilavuus	Puutavarapinon todellinen kuorellinen tilavuus
Lidar	Light detection and ranging
Ortokuva	Useista ilmakuvista tehty yhdistelmä, josta on poistettu maastovirheen vaikutus
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RTK	Real Time Kinematic (positioning)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VLOS	Visual Line Of Sight
VTOL	Vertical Take Off and Landing

1 JOHDANTO

UPM Kaukaan tehdasterminaalin kuitupuuvarastojen tilavuutta valvotaan kuukausittain toteutettavissa inventoinneissa. Inventointi suoritetaan aina kuukauden vaihtuessa. Inventoinneilla seurataan vastaanotetun ja tuotantoon ohjatun puuraaka-ainevirtojen kirjanpitoa.

UPM Kaukaan tehdasintegraatin kuitupuuvarastojen inventoinnissa on siirrytty hyödyntämään ilmakuvaukseen ja kuvatulkintaan perustuvaa mittausmenetelmää. Mittausmenetelmä perustuu nykyaikaiseen, vielä osittain kehitysvaiheessa olevaan tekniikkaan: kuvamittaukseen eli fotogrammetriaan. Menetelmässä inventoitavia kuitupuupinoja kuvataan ilmasta käsin kauko-ohjattavaan lennokkiin liitetyllä kameralla. Tulkitsemalla kuva-aineistoa tietokoneohjelmistolla saadaan selvitettyä kuitupuupinon kehystilavuus. Kertomalla kehystilavuus yleisellä muuntoluvulla saadaan tulokseksi pinon kiintotilavuus.

Tämän tutkimuksen aihe syntyi organisaation tarpeesta kehittää uuden mittausmenetelmän tarkkuutta. Tällä hetkellä kuitupuupinojen kiintotilavuuden laskennassa käytettävä muuntoluku on todettu epätarkaksi sovellettavaksi sellaisenaan drone-mittausmenetelmässä. Mittaustuloksena saatu tilavuus ei edusta riittävän tarkasti pinon todellista tilavuutta. Kuukausi-inventointien tuloksien tarkastelussa on havaittu, että drone-mittaus arvioi pinomuodostelmat todellista kiintotilavuutta suurremmiksi. Tämä havainto toimii tutkimuksen lähtöolettamuksena. Yhdeksi kehystilavuuden virhelähteeksi on epäilty pinojen väliin jäävän tyhjän tilan vaikutusta mittaustulokseen. Tilavuuden muunnoksessa käytettävää kerrointa tulisi korjata alaspäin. Nykyiset muunnoskertoimet on johdettu vanhasta pinomittausmenetelmästä, jossa kuitupuupinon kiintotilavuusprosentti muodostetaan pölkkyjen keskimittojen sekä pinotiheystekijöiden perusteella. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena on muodostaa uusi, drone-menetelmään soveltuva pinokuutiokerroin.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää ostopalveluna toteutetun drone-mittaukseen perustuvan kehystilavuuden tarkkuutta ja tutkia siihen vaikuttavia tekijöitä. Työn toimeksiantajana toimii UPM Metsä. Opinnäytetyön aihetta tarjottiin

minulle organisaation aloitteesta. Tutkimuksen aloittamisen aikoihin toimin harjoittelijana UPM Kaukaan mitta-asemalla terminaalivastaavan tehtävissä. Tutustuin työjaksoni aikana kuitupuun tehdasmittauksen menetelmiin, ja opinnäytetyön tekeminen aihepiiriin liittyen tuntui luontevalta ratkaisulta. Tutkimuksen taustalla on yhtiön tavoite kehittää sekä tehostaa kuitupuun terminaalivarastojen inventointitoimintaa. Yhtiön tavoitteena on, että lähitulevaisuudessa raaka-ainevarastojen inventoinnissa siirryttäisiin mahdollisesti kokonaan drone-kuvaukseen perustuvaan mittausmenetelmään. Aihepiiristä ei ole tiettävästi tehty aiemmin vastaavaa julkista tutkimusta. Dronejen hyödyntäminen puutavarapinojen inventoinnissa on suhteellisen uusi innovaatio, eikä menetelmään ole vielä luotu vakiintuneita standardeja. Yhtiössä ollaan yleisesti kiinnostuneita drone-tekniikan hyödyntämismahdollisuuksista erityisesti metsäsuunnittelun saralla.

2 PUUTAVARAN MITTAUS

2.1 Yleistä kuitupuun mittauksesta

Puutavaran mittauksella tarkoitetaan jalostamattoman puutavaran määrän ja laadun toteamista kauppahinnan, palkan tai urakointimaksujen laskemista varten (Luonnonvarakeskus 2022). Lisäksi mittauksia tehdään puunhankinnan valvonnan tehtäviä ja puuraaka-aineen tuotannon ohjausta varten (Hujo & Lindblad 2006, 350). Mittaus on kaikkein taloudellisinta tehtaalla suoritettuna. Tehdasmittauksesta on etua sekä puun myyjälle että ostajalle. Mittauksen keskittäminen tehtaalle vähentää hankintaketjun työvoiman tarvetta sekä alentaa kustannuksia. Tehtailla käytettävät kehittyneet mittausmenetelmät sekä mittalaitteet mahdollistavat puutavaran tarkan mittauksen. Mittauksessa käytettävät menetelmät ja laitteet ovat kaikille myyjille samat. Tehdasmittaus on myös helpommin valvottavissa kuin tienvarsimittaus, mikä lisää sen luotettavuutta. (Sipi 2009, 73.)

Puutavaran mittaukseen on olemassa lukuisia menetelmiä. Mittauksessa selvitettäviä yleisimpiä suureita ovat puuaineksen tilavuus sekä massa. Tarkin tapa mitata puuaineksen tilavuutta on pölkkyjen kappaleittainen mittaus. Käsitellessä suuria volyymeja puutavaraa runkojen kappaleittainen mittaus ei kuitenkaan ole käytännöllisesti eikä ajallisesti mielekästä.

Suurien puutavaramuodostelmien, kuten pinojen, nippujen ja kuormien tilavuutta arvioidaan fyysisten ulottuvuuksien ja painon mittaukseen perustuvilla laskentamenetelmillä. Tehdasmittauksessa suurien puutavaraerien mittauksessa hyödynnetään otantamenetelmää, jossa mitataan ensin koko puuerän massa, joka muunnetaan sitten tilavuudeksi otantaan valittujen näytenippujen tuottaman muuntoluvun (tuoretiheys) avulla. (Metsäteho 2018a.)

Tämän tutkimuksen kannalta olennaisia mittausmenetelmiä ovat kuitupuun pinomittaus sekä paino-otantamittaus, joita käsitellään tarkemmin kappaleissa 2.2 ja 2.3.

2.2 Kuitupuun pinomittaus

2.2.1 Pinomittaus yleisesti

Ennen drone-inventointimenetelmän käyttöön ottamista UPM:n tehdasvarastojen kuitupuupinomuodostelmien kiintotilavuuden mittauksessa sovellettiin perinteistä pinomittausmenetelmää. Pinomittaus suoritetaan manuaalisesti miestyönä mittanauhalla sekä mittakepillä. Mittaus on tapana suorittaa parityönä, jossa yksi henkilö mittaa pinon ulottuvuuksia ja toinen toimii kirjurina. Pinomittausmenetelmä perustuu pinossa olevan tyhjän tilan osuuden arviointiin. Menetelmässä mitataan pinon kehystilavuus sen ulkoisten mittojen perusteella, määritetään runkojen keskiläpimitta, arvioidaan pinotiheystekijöiden luokat ja määritetään pinotiheyskerroin. Kertomalla kehystilavuus pinotiheyskertoimella saadaan tulokseksi pinon todellinen kuorellinen kiintotilavuus. Menetelmä soveltuu korkeintaan 6 metriä pitkän likipituisen tai määrämittaan katkotun kuitupuun kiintotilavuuden mittaukseen (Sipi 2009, 71). Pinomittauksessa noudatetaan Metsätehon laatimia ohjeita sekä Luonnonvarakeskuksen julkaisemia ajantasaisia muuntolukuja. Luonnonvarakeskus julkaisee säännöllisin väliajoin päivitettävän version puutavaran mittauksessa käytettäviä yleisiä muuntolukuja käsittelevästä määräyksestä. (Metsäteho 2003; Luonnonvarakeskus 2017.)

Pinomittausmenetelmän heikkoutena on sen riippuvaisuus mittaajan subjektiivisesta arviosta sekä kokemuksesta. Pinomittauksen tulos perustuu aina mittauksen suorittajan henkilökohtaiseen arvioon sekä osaamisen tasoon. Näkemys pinon tilavuudesta voi poiketa suuresti kokeneen ja kokemattoman mittaajan välillä. Mittauksen onnistuminen edellyttää selkeää ja yhtenäistä ohjeistusta sekä vankkaa ammattitaitoa. (Hujo & Lindblad 2006, 351.)

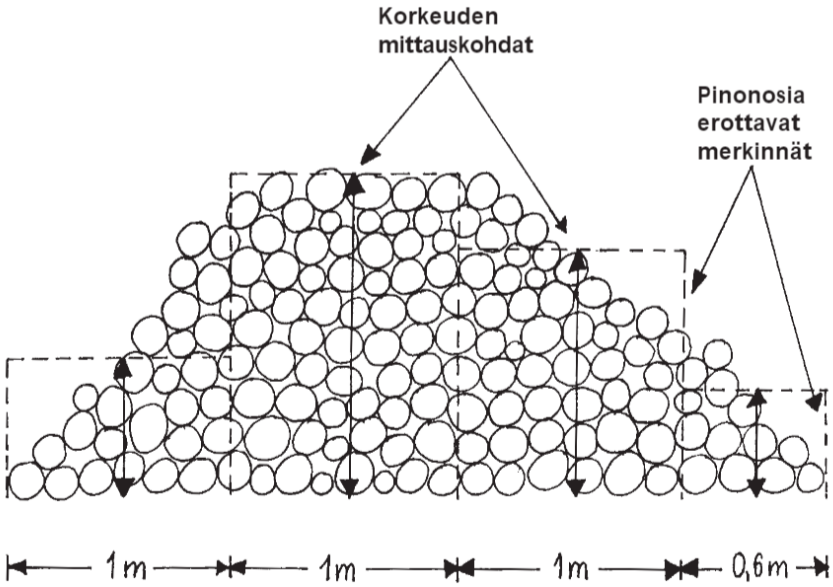
2.2.2 Pinon pituus

Pinon pituuden mittaus toteutetaan määrittämällä pinon reunimmaisten runkojen välinen etäisyys. Pituus ilmoitetaan kymmenen senttimetrin tarkkuudella. Mittaus suoritetaan pinon molemmilta puolilta. (Metsäteho 2018b.)

Tehdasvarastojen inventoinnissa pino mitataan ainoastaan sen etupuolelta käytännöllisistä syistä. Näin menetellään ajan säästämiseksi. Pinomuodostelmat sisältävät useita peräkkäisiä pinoja tiiviisti ladottuina, jolloin pituuden mittaaminen toiselta puolelta on mahdotonta. Perimmäisten pinojen pituudet mitataan lisäämällä ylimenevä osuus etummaisen pinon pituuteen tai vastaavasti vähentämällä lyhyemmän pinon erotus etummaisen pinon pituudesta.

2.2.3 Pinon korkeus

Korkeutta mitatessa pino jaetaan yhden metrin pituisiin pinonosiin kuvan 1 osoittamalla tavalla. Yli kymmenen metriä pitkä pino voidaan jakaa kahden metrin pinonosiin. Pinonosien lukumäärä määritetään pituudeltaan lyhyemmän sivun perusteella. Korkeuden mittaus suoritetaan pinonosittain kummaltakin puolelta 1 cm:n tarkkuudella. Mittaus tehdään pinonosan keskikohdasta alimman pölkkyrivin tasoitetuksi katsotusta alareunasta kohtisuoraan ylimmän, tasoitetuksi katsotun pölkkyrivin yläreunaan. Pinon alla olevat aluspuut tai esim. kivet ja kannot on huomioitava reunan tasoituksessa. Pinossa olevan lumen, jään tai vieraan aineen vaikutus on vähennettävä pinonosien korkeudesta. (Metsäteho 2018b.)



KUVA 1. Pinon jakaminen pinonosiin korkeuden mittausta varten. (Metsäteho 2003)

Tehdasvarastojen kuitupuupinot ovat pituudeltaan varsin pitkiä, peräti satametrisiä. Sadan metrin pituisen pinon mittauksessa ei ole käytännöllistä jakaa sitä kahden metrin pinonosiin. Ajan säästämiseksi pinon korkeus määritetään 3–5 kohdasta ainoastaan pinon etupuolelta. Pinon reunojen korkeuserot huomioidaan keskimääräisen korkeuden määrittämisessä. Etummaisen pinon korkeus mitataan teleskooppisen mittakepin kanssa, mutta sisempien pinojen korkeuden mittaus on haastavampi prosessi. Sisempien pinojen korkeuden mittaus oli tapana toteuttaa kiipeämällä pinojen päälle ja laskemalla mittanauhaa pinojen väliin jäävään kapeaan tilaan. Tästä menettelytavasta on luovuttu työturvallisuusriskien vuoksi.

2.2.4 Pinon leveys

Määrämittaan katkotun kuitupuupinon leveys on sama kuin pölkkyjen keskipituus. Likipituisen kuitupuun mittauksessa leveys mitataan pinonosittain. Pinon etu- ja takasivut tasoitetaan silmämääräisesti ja tasauskohtien välimatka mitataan 5:cm tasaavaa luokitusta käyttäen. Pinon leveys on pinonosien leveyksien keskiarvo, joka ilmoitetaan 1 cm:n tarkkuudella. (Metsäteho 2018b.)

Tehdasvarastopinojen inventoinnissa ei mitata pinonosia, vaan pinon leveytenä käytetään pölkkyjen keskipituutta.

2.2.5 Pinon kehystilavuus

Pinon kehystilavuuden laskennassa jokaisen pinonosan kehystilavuudet lasketaan yhteen. Kehystilavuus ilmoitetaan 0,01 m³:n tarkkuudella. Pinonosien kehystilavuuden laskennassa pinon pituus, leveys ja korkeus kerrotaan keskenään. Pinonosan korkeus on etusivulta ja takasivulta mitatun korkeuden keskiarvo. Viimeisen pinonosan pituus on pinon etusivulta ja takasivulta mitatun pituuden keskiarvo. (Metsäteho 2003.)

Esimerkki kehystilavuuden laskennasta:

Kuvitteellisessa pinossa on neljän metrin likipituuteen katkottua kuusikuitua. Pinon pituus on etusivulta 3,70 metriä ja takasivulta 4,10 metriä (taulukko 1). Pino jaetaan kolmeen 1 metrin pituiseen pinonosaan, jolloin viimeisen pinonosan pituudeksi jää etusivulla 0,70 metriä ja takasivulla 1,10 metriä (taulukko 2). (Esimerkki on Metsätehon oppaasta 2003)

TAULUKKO 1. Yhtä pitkien pinonosien leveys ja korkeus. (Metsäteho 2003)

Pinonosa	Pinonosan leveys	Korkeus etusivulta	Korkeus takasivulta
1	425	152	148
2	410	176	181
3	440	143	138
Keskiarvo	425	156	

Yhtä pitkien pinonosien kehystilavuus on 3 x 425 x 156 / 10000 = **19,89 m³**

TAULUKKO 2. Viimeisen pinononosan pituus, leveys ja korkeus. (Metsäteho 2003)

Pituus etusivulta	Pituus takasivulta	Pinonosan leveys	Korkeus etusivulta	Korkeus etusivulta
0,70	1,10	440	49	63
0,90		440	56	

Viimeisen pinonosan kehystilavuus on 0,90 x 440 x 56 / 10000 = **2,22 m³**
Koko pinon kehystilavuudeksi saadaan 19,89 + 2,22 = **22,11 m³**

2.2.6 Kiintotilavuusprosentti

Pinon kiintotilavuusprosentilla tarkoitetaan pinossa olevien pölkkyjen kiintotilavuuden ja kehystilavuuden suhdetta (Metsäteho 2018c). Kuitupuupinon todellinen tilavuus lasketaan kiintotilavuusprosentin avulla. Pinon kehystilavuudesta vähennetään muunnoskertoimen avulla runkojen väliin jäävän tyhjän tilan osuus.

Kiintotilavuuden muodostuksessa määritetään ensin pinon keskimääräinen kiintotilavuusprosentti puulajin ja puutavaran pituuden perusteella (taulukko 3). Tämän jälkeen keskimääräiseen kiintotilavuusprosenttiin lisätään pinotiheystekijöiden vaikutus (taulukot 4–7). Vaikuttavia pinotiheystekijöitä ovat puutavarapölkkyjen keskimääräinen läpimitta (taulukko 4), karsinta ja oksaisuus (taulukko 5), mutkaisuus (taulukko 6) ja ladonta (taulukko 7). Puutavarapölkkyjen keskiläpimitta määritetään mittaamalla runkojen katkaisupintojen aritmeettinen keskiarvo. Pinon karsinnan, oksaisuuden, mutkaisuuden ja ladonnan luokat arvioidaan silmämääräisesti ja toisistaan riippumatta. (Metsäteho 2018d.) Keskimääräiset kiintotilavuusprosentit sekä pinotiheystekijät ovat esitettynä alla olevissa taulukoissa. Taulukot ovat peräisin Luonnonvarakeskuksen ajantasaisesta puutavaran mittaukseen liittyviä muuntolukuja käsittelevästä ajantasaisesta määräyksestä.

TAULUKKO 3. Keskimääräiset kiintotilavuusprosentit. (Luonnonvarakeskus 2017)

Puutavaran pituus, m	Havupuu	Lehtipuu
	Keskimääräinen kiintotilavuusprosentti, %	
2,00–2,50	66	57
2,51–3,50	63	54
3,51–4,50	61	52
4,51–5,50	60	50
5,51–6,00	59	49

TAULUKKO 4. Puutavarapölkkyjen läpimitan keskiarvon vaikutus kiintotilavuusprosenttiin prosenttiyksiköinä. (Luonnonvarakeskus 2017)

Läpimitta, cm	Havupuu	Lehtipuu
	Kiintotilavuusprosentin muutos, prosenttiyksikköä	
9 ja alle	-3	-3
11	0	0
13	+2	+2
15	+3	+4
17	+4	+6
19	+4	+7
21	+5	+8
23	+5	+8
25 ja yli	+6	+9

TAULUKKO 5. Puutavarapölkkyjen karsinnan ja oksaisuuden vaikutus kiintotilavuusprosenttiin prosenttiyksiköinä. (Luonnonvarakeskus 2017)

Luokka	Luokan kuvaus	Havupuu	Lehtipuu
		Kiintotilavuusprosentin muutos, prosenttiyksikköä	
1	ei oksantynkiä eikä oksakyhmyjä	+2	+1
2	joitakin lyhyitä oksantynkiä ja vähäisiä oksakyhmyjä	0	0
3	oksantynkiä ja oksakyhmyjä siellä täällä	-2	-1
4	runsaasti oksantynkiä ja oksakyhmyjä	-4	-2

TAULUKKO 6. Puutavarapölkkyjen mutkaisuuden vaikutus kiintotilavuusprosenttiin prosenttiyksiköinä. (Luonnonvarakeskus 2017)

Luokka	Luokan kuvaus	Havupuu	Lehtipuu
		Kiintotilavuusprosentin muutos, prosenttiyksikköä	
1	pölkyt ovat suoria	+1	+2
2	pölkyt edustavat puulajin keskimääräistä luontaista mutkaisuutta	0	0
3	pölkyt ovat mutkaisia ja pinossa on pölkkyjen mutkaisuudesta aiheutuvaa reikäisyyttä	-1	-2
4	pölkyt ovat suurimmaksi osaksi erittäin mutkaisia		-4
5	käytännöllisesti katsoen kaikki pölkyt ovat erittäin mutkaisia		-6

TAULUKKO 7. Puutavarapölkkyjen ladonnan vaikutus kiintotilavuusprosenttiin prosenttiyksiköinä. (Luonnonvarakeskus 2017)

Luokka	Luokan kuvaus	Havupuu	Lehtipuu
		Kiintotilavuusprosentin muutos, prosenttiyksikköä	
1	pölkyt ovat tiiviisti lomittain	+2	+1
2	pölkkyjä on jonkin verran ristikkäin ja niiden välissä on ladonnasta aiheutuneita rakoja	0	0
3	monet pölkyt ovat ristikkäin ja pölkkyjen välissä on isoja ladonnasta aiheutuneita rakoja	-2	-1
4	pölkkyjä on erittäin runsaasti ristikkäin ja pinossa on isoja ladonnasta aiheutuneita aukkoja	-4	-3

TAULUKKO 8. Esimerkkipinon pinotiheystekijät koottuna. (Metsäteho 2003)

Tekijä	Luokka	Vaikutus
Keskimääräinen kiintotilavuus-%	3,51–4,50 m	61
Keskiläpimittaluokka	13 cm	+2
Karsinta- ja oksaisuusluokka	1	+2
Mutkaisuusluokka	2	0
Ladontaluokka	3	-2

2.2.7 Kiintotilavuuden laskenta

Pinon kiintotilavuus saadaan selville kertomalla mitattu kehystilavuus pinotiheystekijöiden mukaan muodostetulla kiintotilavuusprosentilla. Kiintotilavuus ilmoitetaan 0,1 m³:n tarkkuudella. (Metsäteho 2003.)

Esimerkkipinon kiintokuutioksi saadaan: 22,11 * 63 / 100 = **13,9 m³**

2.3 Paino-otantamittaus

Paino-otantamittaus on toinen tehokas menetelmä kuitupuuerän kiintotilavuuden selvittämiseen. Muuntolukuun perustuva menetelmä on yleisimmin käytössä oleva tehdasmittausmenetelmä sellaisilla tuotantolaitoksilla, joissa vuotuiset vastaanottomäärät ovat suuret (Metsäteho 2018e). Paino-otantamittaus antaa tarkemman ja luotettavamman arvion puuerän kiintotilavuudesta verrattuna pinomittaukseen.

Paino-otantamittauksessa punnitaan ensin koko vastaanotetun puutavaraerän tuoremassa. Punnitseminen toteutetaan ajoneuvovaa'alla tai kurottajatrukin kuormainvaa'alla. Punnitsemisen jälkeen selvitetään puuerän tuoretiheys otantamenetelmällä. Vastaanoton tietojärjestelmä valitsee otantaan tulevat näyte-erät sattumanvaraisesti toimittajakohtaisen otantaprosentin perusteella. Näyte-eränä toimii ajoneuvokuorma, puutavaranippu tai puutavaranipun osa. Tuoretiheys eli tilavuuspaino tarkoittaa puuaineksen massan ja tilavuuden suhdetta (kg/ m³).

Otantaerien tilavuus saadaan selville upotusmittauksella. Otantanipuista mitattujen tuoretiheyksien aritmeettinen keskiarvo on koko mittauserän keskimääräinen tuoretiheys. Tuoretiheys ilmoitetaan 1 kg/ m³:n tarkkuudella. Koko mitattavan puuerän kiintotilavuus saadaan selville jakamalla erän massa sen keskimääräisellä tuoretiheydellä. Tilavuus ilmoitetaan 0,1 m³:n tarkkuudella. (Sipi 2009, 78, 81.)

Puutavaran kaukokuljetuksen yhteydessä tehtävässä kiintotilavuuden mittauksessa käytetään Luonnonvarakeskuksen yleisiä tuoretiheyslukuja, jotka määräytyvät puulajin, puutavaran mittojen, puutavaralajin, maantieteellisen alueen, mittausajankohdan ja kuivuusasteen mukaan. (Luonnonvarakeskus 2013.)

Otantanippujen tilavuus selvitetään upotusmittauksella. Menetelmällä voidaan selvittää puutavaranippujen tai yksittäisten pölkkyjen kiintotilavuus. Menetelmän toimintaperiaate perustuu Arkhimedeen lakiin. Upotusmittauksessa punnitus tapahtuu kurottajatrukin ja ajoneuvovaa'an avulla. Aluksi puutavaranippu punnitaan ilmassa kurottajatrukin kourassa. Sen jälkeen nippu punnitaan upotusaltaaseen upotettuna (kuva 2). Ilmassa punnitusta massasta vähennetään vedessä punnittu massa sekä kuormaimen aiheuttaman nosteen vaikutus. Vähennyslaskulla saatu massa jaetaan vielä veden tiheydellä, jolloin lopputulokseksi saadaan otantanipun tilavuus. Mittatulos ilmoitetaan 0,1 m³:n tarkkuudella. Upotuspunnitusaltaan rakentamiskustannukset ovat melko suuret, jonka vuoksi niitä on käytössä vain sellaisilla mittauspaikoilla, joiden vuotuiset puutavaran vastaanottovolyymit ovat suuret. (Metsäteho 2018e, 2018f.)

KUVA 2. Kurottajatrukki upottamassa puutavaranippua upotusaltaaseen. (Metsäteho 2018)

Pienemmillä mittauspaikoilla, joilla ei ole upotusallasta, näytenippujen mittaus toteutetaan pölkkykohtaisella saksimittauksella eli nappuloinnilla. Manuaalisessa mittausmenetelmässä pölkkyjen tilavuudet määritetään keskuskiintomittauksella, jossa mitataan pölkyn pituus sekä keskusläpimitta pituuden puolivälistä. Pölkyn tilavuus lasketaan lieriön kaavalla pituuden ja keskusläpimitan perusteella. Pölkkyjen tilavuudet lasketaan yhteen ja otantanipun tilavuutta korjataan keskipituudella ja tyvipölkkyjen osuudella määrittävällä keskusmuotoluvulla. (Hujo & Lindblad 2006, 372, 374.)

3 DRONE-MITTAUS

3.1 Yleistietoa droneista

Dronet eli miehittämättömät ilma-alukset ovat nimensä mukaisesti lentäviä aluksia, joita lennätetään ilman pilottia. Miehittämättömistä ilma-aluksista käytetään useita erilaisia termejä ja lyhenteitä, joilla tarkoitetaan suunnilleen samaa asiaa, mutta termien välillä on pieniä käsitteellisiä eroja. Lyhenteellä UAV (Unmanned Aerial Vehicle) viitataan ainoastaan itse lentävään laitteeseen. UAS (Unmanned Aerial System) käsittää dronen lisäksi siihen kytketyn hyötykuorman (kameran) ja maassa olevan ohjainyksikön (tietokoneen tai tabletin). Lyhenteellä RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) tarkoitetaan samaa kuin UAS, mutta termillä on haluttu täsmentää, että kysymyksessä ihmisen kontrolloima ilma-alus, eikä täysin autonominen laite. (KMTK 2018, 2.) Dronen lentoa tarkkaillaan maasta käsin tietokoneella operoitavan lentosuunnitteluohjelmiston (Ground Control Station) avulla. Useimmissa droneissa on autopilotti, jonka avulla ne pystyvät lentämään itsenäisesti ennalta määriteltyjä reittejä. Autopilotilla varustetuissa droneissa on oltava aina vaihtoehto ottaa laite haltuun manuaaliseen kauko-ohjaukseen vika- ja vaaratilanteissa. (Hassinen 2013, 3.)

3.2 Dronejen luokittelu

Miehittämättömät ilma-alukset luokitellaan tavallisesti kiinteäsiipisiin ja pyöriväsiipisiin aluksiin. Kiinteäsiipinen (Fixed Wing) drone muistuttaa ulkomuodoltaan pitkälti lentokonetta. Kiinteäsiipinen drone tarvitsee lentoonlähtöä sekä laskeutumista varten kiitoradan. Pyöriväsiipisistä droneista puhuttaessa tarkoitetaan kopteridroneja. (KMTK 2018, 10.) Toinen yleinen nimitys pyöriväsiipiselle dronelle on multikopteri. Markkinoilla on saatavilla useilla erilaisilla moottorimäärillä varustettuja multikoptereita, joista yleisimmät tyypit ovat:

- Quadrokopterit (4 moottoria)
- Hexakopterit (6 moottoria)
- Oktokopterit (8 moottoria)

Multiroottoriset kopterit eivät tarvitse kiitorataa, vaan pystyvät nousemaan lentoon ja laskeutumaan täysin pystysuoralla akselilla. Tätä kutsutaan VTOL-ominaisuudeksi (Vertical Take Off and Landing). VTOL-ominaisuus tekee multikoptereista käyttötarkoituksiltaan ylivoimaisia verrattuna kiinteäsiipisiin droneihin. (Tervo 2017, 14.)

3.3 Droneihin liittyvät säädökset ja rajoitukset

Dronejen lennättäminen on Suomessa sääntelyn alaista toimintaa. Sääntely perustuu Euroopan Unionin miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien käyttäjiä koskevaan asetukseen 2019/945. Asetuksen mukaan kaikkien yli 250 grammaa painavien tai kameralla varustettujen dronejen käyttäjien täytyy rekisteröityä, tutustua laitteen turvalliseen lennättämiseen sekä suorittaa teoriakoe. Asetus koskee dronejen harraste- sekä ammattitarkoituksissa tapahtuvaa lennätystä. Suomessa ilmailutoimintaa valvovana ja sääntelevänä viranomaisena toimii Traficom. Dronejen lennätykseen liittyy useita rajoittavia sääntöjä. Suurin sallittu lennätyskorkeus on 120 metriä maan tai veden pinnasta. Dronen lennättäjän on aina säilytettävä suora näköyhteys laitteeseen (VLOS = Visual Line Of Sight). Lennätys on aina tapahduttava turvallisen välimatkan päässä ihmisistä, eikä dronea saa lennättää ihmisjoukkojen yläpuolella. (Traficom 2022.)

3.4 Tutkimuksessa käytetyn dronen ominaisuudet

Tutkimuksen koemittauksissa käytettiin kuvassa 3 esitettyä DJI:n valmistamaa Mavic Pro nelikopteridronea. Kopteri on kooltaan varsin kompakti. Se painaa lisälaitteineen noin 750 grammaa. Laitteessa on vakiovarustuksena 12 megapikselin kamera. Kameralla voidaan tallentaa 4K-resoluution videokuvaa. Kamerassa on 3-akselinen gimbaali, joka mahdollistaa vakaan kuvamateriaalin tuottamisen lennon aikana. Laitteen akun maksimikapasiteetti mahdollistaa 27 minuutin lentoajan. Käytännössä laitteella voidaan toteuttaa kahdenkymmenen minuutin lentoja kerrallaan, kun huomioidaan lentoon nousu, laskeutuminen ja sääolojen vaikutukset. Dronen paikannusjärjestelmä käyttää GNSS- ja GLONASS-tekniikkaa. (DJI 2022.)

KUVA 3. Mittauksissa käytetty DJI Mavic Pro nelikopteri. (Tikka 2021)

3.5 Fotogrammetria

Dronella toteutettava kiintotilavuuden mittausmenetelmä perustuu fotogrammetriaan eli kuvamittaukseen. Mittaustekniikka on tunnettu jo valokuvauksen keksimisen ajoista lähtien. Menetelmässä kohteen mittaus tapahtuu välillisesti valokuvien kautta kohteeseen fyysisesti koskematta. Kuvattavien kohteiden muotoja sekä mittoja mitataan kuvaparien avulla. Menetelmää hyödynnetään esimerkiksi herkästi hajoavien rakennelmien mittauksessa, joiden fyysinen mittaus ei ole mahdollista. Menetelmä on edukseen erityisesti kooltaan suurien kohteiden kartoituksessa, kuten ilmakuvauksessa. (Vinni 2003.)

Ilmakuvauksessa kuvattavan kohteen yllä lennettäessä kamera laukaistaan siten, että jokainen kuvattava alue näkyy vähintään kahdella kuvalla. Kuvien välillä pitää olla riittävästi yhteisiä havaintokohtia, jotta ne voidaan yhdistää toisiinsa. Osittain päällekkäin menevistä kuvista muodostetaan kuvajonoja, ja vierekkäisistä kuvajonoista muodostetaan kuvablokkeja. Vierekkäisten kuvien päällekkäin menevää aluetta kutsutaan pituuspeitoksi ja kuvajonojen päällekkäin menevää aluetta sivupeitoksi. Kuvapeittoja optimoidaan säätelemällä kuvanottoväliä sekä lentonopeutta. (Vinni 2003.) Kuituvarastojen inventoinnissa pinomuodostelmat kuvataan systemaattisesti jokaisesta suunnasta. Koepinojen mittauksessa kuvajonojen välinen sivupeitto oli 85 %.

Fotogrammetrinen mittausprosessi on kaksivaiheinen. Kuvauksen jälkeen kuva-aineisto käsitellään tietokoneella 3D-mallinnusohjelmistossa. Konenäköä hyödyntävä ohjelma jalostaa kuva-aineistosta kolmiulotteisen pistepilven. Valokuvia voidaan muokata mieluiseksi korostamalla tai häivyttämällä haluttuja ominaisuuksia. Kuvien prosessointi edellyttää tietokoneelta suurta laskentatehoa. Prosessin pituuteen vaikuttaa käsiteltävän aineiston koko eli valokuvien lukumäärä. Ennen 3D-pistepilven muodostusta kuva-aineisto käydään manuaalisesti läpi valiten niistä laadukkaimmat ja poistaen huonolaatuiset otokset tällöin nopeuttaen käsittelyprosessia. Mallinnusprosessissa ohjelmisto sovittaa kuvia toisiinsa niissä esiintyvien yhteisten liitospisteiden avulla, orientoi kuvat samaan koordinaatistoon ja muodostaa lopulta teksturoidun kolmiulotteisen mallin. Valokuvaan yhdistetään sijaintitieto, kuvanottohetken aika, sekä tiedot kameran asennosta. Tietojen avulla määritetään kameran etäisyys suhteessa kohteeseen, jonka perusteella määritetään kohteen mittasuhteet. Lennon aikana kuvauskorkeus pidetään aina samana. Pistepilven lisäksi kuva-aineistosta voidaan luoda esimerkiksi ortokuvia ja korkeusmalleja. (Rumble Tools 2021.)

Fotogrammetrisissa mittauksissa kuvattava aineisto sovitetaan yleiseen koordinaattijärjestelmään, eli kuva-aineisto georeferoidaan. Koordinaatistoon sovittaminen tehdään maastotukipisteiden (GCP, Ground Control Point) avulla. Maastotukipisteet ovat kuvattavan kohteen ympärille maahan sijoitettavia signaalilevyjä (kuva 4), jotka erottuvat selvästi ilmakuvissa. Maastotukipisteiden tarkat koordinaatit mitataan takymetrilla tai RTK-GPS:llä (Real Time Kinematic, reaaliaikainen kinemaattinen mittaus). RTK-paikannus yltää 3 cm:n tasotarkkuuteen ja 4 cm:n korkeustarkkuuteen. Georeferointi on olennainen osa mittausmenetelmää, sillä maastotukipisteiden sijaintitarkkuus määrittää kuvatun aineiston mittaustarkkuuden. (KMTK 2018, 8.)

KUVA 4. Georeferoinnissa käytettävä maastotukipiste. (Pix4D, 2019)

Kuvauksessa on kiinnitettävä huomioita riittävän laadukkaiden valokuvien tuottamiseen, jotta ohjelmisto pystyy laskemaan niiden pohjalta tarkan kolmiulotteisen mallin. Kuvien on oltava teräviä, selkeäkontrastisia ja valaistuksen on oltava tasainen koko kuvattavan kohteen alueella. Fotogrammetrisen mallin laskentaa vääristää kuvattavassa kohteessa olevat läpinäkyvät ja heijastavat pinnat, erityisen ohuet muodot tai katveeseen jäävät varjoisat alueet. (Rakennustieto Oy 2019, 4, 7.) Tietyt sääolosuhteet rajoittavat kuvaustoimintaa. Kuvaukset tulee toteuttaa päiväsaikaan, jolloin on riittävän valoisaa. Auringon matalat korkeuskulmat aiheuttavat varjoisuutta kuvattavaan kohteeseen. Kuvausajankohta kannattaakin sijoittaa lähelle keskipäivää, jolloin aurinko on korkeimmillaan. Optimaalisin valaistus kuvaukselle saavutetaan pilvipoudalla, jolloin varjoisuutta syntyy vähiten. (KMTK 2018, 6.) Rakenteeltaan kevyemmät dronet ovat alttiita tuulelle, jo 5 m/s tuuli vaikeuttaa kuvausta huomattavasti. Kuvausta ei myöskään voida tehdä kovassa vesi- tai lumisateessa heikon näkyvyyden vuoksi. Sadevesi voi vahingoittaa laitteen elektroniikkaa. Talvisaikaan kova pakkanen heikentää laitteen akun kestoa. (Hassinen 2013, 41–42.)

3.6 Ground Sampling Distance

Ilmakuvauksessa kuvan kykyä esittää yksityiskohtia ilmaistaan GSD:llä, (Ground Sampling Distance) joka on maastoresoluutiota mittaava yksikkö. GSD:n arvo il-

maistaan senttimetreinä. Maastoresoluution arvo kertoo kuinka monta senttimetriä maastossa yksi pikseli vastaa ilmakuvassa. Esimerkiksi jos GSD on 5 cm/pikseli, niin ilmakuvassa yksi pikseli vastaa viiden senttimetrin kokoista alaa maastossa. Mitä suurempi GSD:n arvo on, sitä pienempi on kuvan resoluutio. (Pix4D N.d.) Droneilla otetuilla ilmakuvilla päästään 1–4 cm:n pikselitarkkuuteen. Vertailuna tavallinen ilmakuva, jonka tarkkuus on 10 cm/pikseli luokkaa ja satelliittikuva, jonka tarkkuus on 20–50 cm/pikseli. (Hassinen 2013, 4–5.) Tutkimuksessa käytetyllä dronella päästään 2 cm/pikseli maastoresoluutioon.

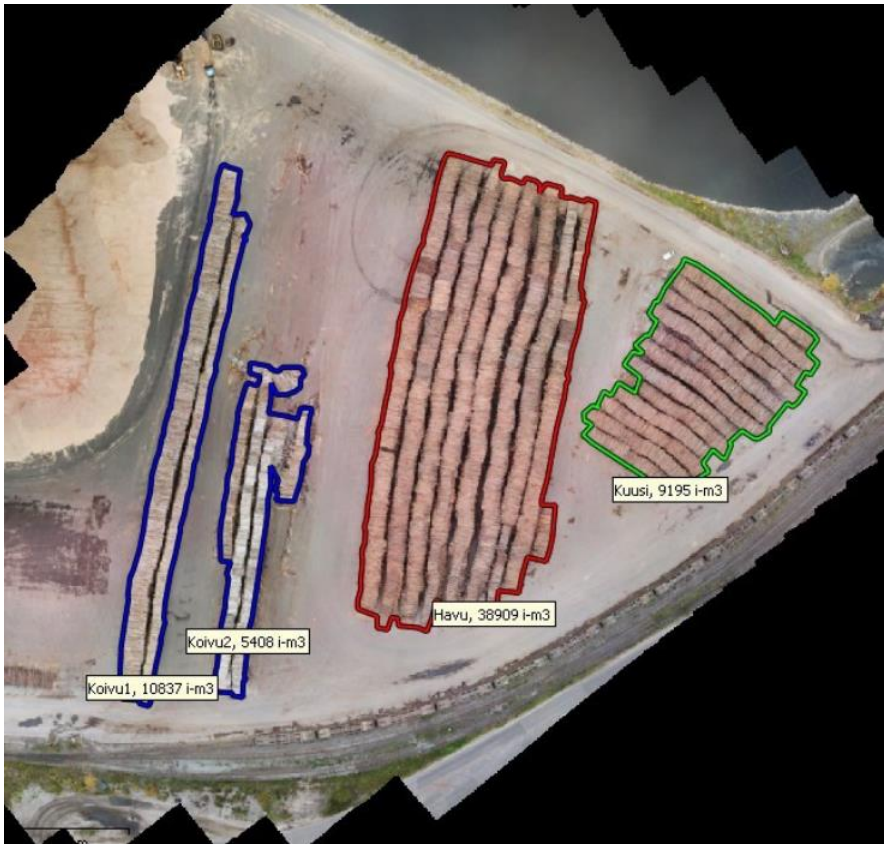
GSD:n tarkkuus määräytyy kameran polttovälin, sensorin tarkkuuden ja lentokorkeuden perusteella. Aineiston maastoresoluutiota voidaan parantaa yksinkertaisesti madaltamalla lentokorkeutta. Samalla kuitenkin yhdellä lennolla kuvattavan alueen koko pienenee, jolloin kuvaukseen käytettävä aika kasvaa. Toinen keino on panostaa korkealaatuiseen kamerajärjestelmään. (KMTK 2018, 4, 9.)

3.7 Kuukausi-inventointi Kaukaalla

Kaukaan tehdasalueen kuitupuuvarastojen inventointi on järjestetty ostopalveluna Rumble Tools -nimiseltä yritykseltä. Rumble Tools Oy on Imatralla toimiva autonomisiin drone-järjestelmiin sekä kuvaus- ja valvontapalveluiden tuottamiseen keskittynyt yritys. Varastopinojen inventointi suoritetaan säännöllisesti aina kuukauden vaihteessa. Inventoinneilla valvotaan tehdasintergraatin raaka-ainevarastojen kirjanpitoa. Kuitupinomuodostelmien lisäksi tehdasalueella varastoitavat hakeaumat inventoidaan myös.

Kuvauslennon valmistelutoimenpiteenä dronen autopilotille määritetään oikea lentosuunnitelma Map Pilot Pro -lentosuunnittelusovelluksessa. Lentoratojen suunnittelussa kartoitettava kohdealue rajataan sovelluksen satelliittikuvanäkymässä. Ohjelmassa asetetaan dronelle haluttu lentokorkeus, nopeus sekä sivu- ja pituuspeitot. Ohjelmisto määrittä asetettujen parametrien perusteella otettavien kuvien määrän sekä kuvanottopaikkojen sijainnit automaattisesti. Inventoitavat kuitupuupinot ja hakekasat eivät muodosta yhtä yhtenäistä aluetta, vaan raaka-ainemassoja varastoidaan useassa eri paikassa ympäri tehdasaluetta. Kuitu- ja hakemuodostelmien inventointi edellyttää useita kuvauslentoja. Kuvauslennoilla

inventoitavien alueiden yhteenlaskettu pinta-ala noin 14 hehtaaria. Kuvauslennoilla voidaan käyttää samoja lentosuunnitelmia, sillä varastoalueiden sijainnit pysyvät samoina. Mittauksen georeferoinnissa ei käytetä maastotukipisteitä apuna. Drone käyttää georeferoinnissa GNSS-satelliittipaikannusta. Kaikkien kuitu- ja hakevarastojen ilmakuvaukseen kuluu sääolosuhteista ja varastojen koosta riippuen kahdesta neljään tuntia. Kuva-aineiston käsittely on aikaa vievä prosessi. Suuren kuva-aineiston jalostaminen pistepilveksi mallinnusohjelmistossa vie tavallisesti yhdeksästä yhteentoista tuntia. Rumble Tools tuottaa kuva-aineistosta kolmiulotteisen pistepilven, josta voidaan laskea pinojen kehystilavuus. Raportti inventoinnista on seuraavana päivänä valmis lähetettäväksi mittaasemalle. Inventointiraportti sisältää yhteenvedon tehdasalueen raaka-ainevarastoista sekä kuva-aineistoa inventoiduista kuitupinoista ja hakekasoista (kuva 5).



KUVA 5. Esimerkki yhdestä syyskuun 2021 inventointiraportin sisältämästä ortokuvasta. (Rumble Tools, 2021)

4 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

4.1 Tutkimusmenetelmä

Empiirisessä tutkimuksessa tutkimustulokset pyritään hankkimaan tekemällä konkreettisia havaintoja tai mittauksia tutkittavasta kohteesta (Jyväskylän yliopisto 2015a). Kerättyä aineistoa tarkastellaan ja analysoidaan tutkimuksen lähtöolettamuksen pohjalta. Empiirisessä tutkimuksessa pyritään havainnollistamaan teoreettista lähtöolettamaa käytännössä toistettavissa olevien koeasetelmien avulla. Tämä opinnäytetyö on luonteeltaan määrällinen eli kvantitatiivinen tutkimus. Määrällisessä tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita selvittämään numeerisin arvoin selitettävissä olevia ilmiöitä. Kvantitatiivinen tutkimuksessa aineistoa käsitellään erilaisilla laskennallisilla ja tilastollisilla analysointimenetelmillä. (Jyväskylän yliopisto 2015b.)

4.2 Mittausjärjestelyt

Tutkimuksen käytännön osuus toteutettiin koejärjestelyin, joissa ennalta tilavuusmitattuja kuitupuueriä mitattiin drone-menetelmällä. Varsinainen mittaustyö tapahtui dronen operointiin perehtyneen ammattilaisen toimesta. Drone-mittauksen tuottama mittausdata toimi tutkimuksen aineistona. Saatuja mittaustuloksia verrattiin paino-otantamittauksilla tuotettuihin tuloksiin. Koemittauskertoja järjestettiin useita, joiden tarkoituksena oli tarkastella keskenään erilaisia pinomuodostelmia (yksi pino, monta rinnakkaista pinoa, muut muuttujat). Tavoitteena oli tarkastella pinojen sekä pinovälien lukumäärän vaikutusta mittatulokseen. Erityisenä kiinnostuksen kohteena oli pinojen väleihin jäävän tyhjän tilan vaikutus kehystilavuuteen. Drone-kuvauksen rinnalla osa tutkimuspinoista mitattiin perinteisellä pinomittauksella vertailumielessä.

Koemittaukset toteutettiin Lappeenrannassa Kaukaan tehdasalueen varastokentällä sekä Kotkassa Hallan raakapuuterminaalissa lokakuussa ja marraskuussa 2021. Mittauksissa kerättyä aineistoa tarkasteltiin lähdekirjallisuuteen ja aikaisempiin tutkimuksiin tukeutuen. Yhtenä tiedonhankinnan keinona hyödynnettiin

myös aiheen parissa toimivien henkilöiden, kuten drone-kuvauspalvelun edustajan ja mitta-aseman henkilöstön vapaamuotoista haastattelua.

Mitattavien pinojen puutavaralajiksi valikoitui likipituuteen katkottu tuontikoivukuitu. Venäläinen koivukuitupuu on todettu ominaisuuksiltaan hyvin tasalaatuiseksi puuraaka-aineeksi, jonka perusteella se soveltui koemittausten kohteeksi hyvin. Muita puutavaralajeja ei mitattu. Koemittaukset järjestettiin siten, että yksi mitattava koepuuerä edusti yhden tuontilaivan vastaanotettua puutavaramäärää. Toimitusmuodoksi valittiin aluskuljetukset yksittäisen laivapuuerän suuren tilavuuden perusteella. Olennaista oli, että yksittäisen laivan puista pystyttiin muodostamaan useista pinoista koostuvia muodostelmia. Puutavara-aluksen vastaanottotodistuksesta selvisi erän hyväksytty kiintokuutiomäärä, jota käytettiin vertailuarvona mittausten tarkastelussa.

Mitattavat tuontipuuerät vastaanotettiin terminaalissa normaalin toimintamallin mukaan muutamin poikkeusjärjestelyin. Satamaterminaalien puun vastaanottoprosessissa aluksen kuorma purettiin urakoitsijan toimesta puutavara-autojen kyytiin ja kuljetettiin varastokentälle odottamaan tuotantoon ohjausta tai jatkokuljetusta. Puuerä punnittiin purun yhteydessä kurottajan kuormainvaa'alla tai ajoneuvovaa'alla. Toimituserästä valittiin paino-otantamenetelmällä näytenippuja, jotka mitataan upotusaltaassa erän tuoretiheyden selvitystä varten. Tuoretiheys yleistettiin koko toimituserälle ja tulokseksi saadaan erän kiintotilavuus.

Koemittausten organisointi edellytti etukäteistä suunnittelua ja kommunikointia asianomaisten tahojen kanssa. Laivapuiden mittausten suunnittelu tehtiin yhteistyössä puutavaran vastaanoton vuoromestarin kanssa. Vuoromestari ohjeisti urakoitsijoita laivojen purun yhteydessä ajamaan koepinot omiksi muodostelmikseen ja pitämään ne erillään muista varastoiduista pinoista.

Koe-erien purun valmistumisen jälkeen sovittiin mittausajankohta Rumble Toolsin mittaajan kanssa. Kuvauslennon valmistelussa mittaaja määritti dronelle lentosuunnitelman rajaamalla kartoitettavan alueen karttaohjelmistoon. Kartoitettava alue oli huomattavasti pienempi kuin kuukausi-inventoinneissa. Tämän jälkeen mittaaja suoritti kuvauslennon dronella rutiininomaisesti. Jokaisessa koemittauk-

sessa noudatettiin samoja asetuksia: dronen lentokorkeus oli 60 metriä, lentonopeus noin 5 metriä sekunnissa ja kuvien peittoprosentti oli 85. Kuva-aineiston käsittely, 3D-pistepilven muodostus (kuva 6) ja kehystilavuuden laskenta tehtiin Agisoft Metashape -ohjelmistolla Rumble Toolsin toimesta. Inventointien kuva-aineistosta muodostettiin koepinoja havainnollistavat ortokuvat, jotka ovat tutkimuksen liitteinä (liitteet 1–5).

KUVA 6. Agisoft Metashape -ohjelmistolla mallinnettu pistepilvi. Pinomuodostelmasta otettiin 238 ilmakuvaa, joista ohjelma määritti 82 502 havaintopistettä. (Rumble Tools, 2021)

Koejärjestelyihin vaikuttivat lukuisat ennakoimattomat muuttujat: sääolosuhteet, puuerien kuljetuksen ja purkamisen viivästykset sekä tuontipuun aluskuljetusten loppuminen Saimaan kanavassa marraskuun alussa. Osa suunnitelluista koemittauksista jäi toteuttamatta laivakuljetusten ennenaikaisen päättymisen vuoksi.

Drone-inventoinnin lisäksi Kaukaan terminaalissa vastaanotetut kuitupuuerät mitattiin manuaalisella pinomittausmenetelmällä tulosten vertailua varten. Kehystilavuuden määrityksessä pinojen pituus mitattiin 50 metrin kelamitalla, korkeus teleskooppimitalla, leveys metsurinmitalla ja pölkkyjen keskiläpimitta tavallisella rullamitalla. Pinojen suurien pituuksien vuoksi niiden korkeudet mitattiin ajan säästämiseksi virallisesta ohjeesta poiketen kahden, viiden ja neljän metrin levyisissä pinonosissa (taulukko 10). Pinojen pituudet ja korkeudet määritettiin ainoastaan yhdeltä puolelta. Pinojen kiintotilavuusprosentti muodostettiin arvioimalla pinotiheystekijät silmämääräisesti.

4.3 Aineiston käsittely

Tutkimuksen koemittauksissa tuotettua aineistoa analysoitiin tilastollisin menetelmin. Paino-otantamittauksen sekä drone-mittauksen tuottamia mittaustuloksia vertailtiin keskenään. Analysoinnissa sovellettiin taulukkolaskentaa ja tilastollisia laskentamenetelmiä. Tutkimuksen tavoitteena oli johtaa aineiston pohjalta keskitunnukset eli uudet keksimääräiset pinokuutiokertoimet.

Tutkimuksen koejärjestelyissä mitattiin yhteensä viisi erilaista pinomuodostelmaa. Koepuuerät on nimetty niitä kuljettaneen aluksen mukaan. Koepuueristä muodostettiin erilaisia pinomuodostelmia pinovälien vaikutusten tarkastelua varten. Koeasetelmissa puita mitattiin 1:n, 2:n, 4:n ja 6:n pinon muodostelmissa. Mitattujen puuerien suuruusluokat vaihtelivat noin 500 ja 4700 kuutiometrin välillä.

Mittaustulosten tarkastelussa dronella mitattu kehystilavuus muutettiin kiintotilavuudeksi yleisellä pinokuutiokertoimella 0,46. Yleisellä muunnoskertoimella määritettyä kiintotilavuutta verrattiin paino-otantamenetelmällä mitattuun kiintotilavuuteen. Paino-otannan tulosta käytettiin kontrollimittana, sillä menetelmä antaa tarkemman arvion puumäärän todellisesta kiintotilavuudesta.

5 TULOKSET

5.1 Drone-mittauksen tulokset

Koepuuerien drone-mittausten sekä paino-otantamittausten tulokset on esitelty alla olevassa taulukossa 9. Drone-mittauksella määritetty kiintotilavuus on laskettu kertomalla kehystilavuus pinokuutiokertoimella 0,46. Drone-mittauksella määritetty kiintotilavuus oli keskimäärin 8,8 prosenttia paino-otannalla määritettyä kiintotilavuutta pienempi. Mittausmenetelmien tuottamien kiintotilavuuksien erot vaihtelivat -24,4 ja 6,52 prosentin välillä. Suurin eroavaisuus tilavuusarvioiden välillä oli koepuuerässä STK-1016, jossa drone-menetelmä arvioi pinon 349,4 m³ eli 24,4 % paino-otantaa pienemmäksi. Suuren eron selittävänä tekijänä on puiden muodostaminen yhdeksi pinoksi, jolloin pinovälit eivät vaikuta kehystilavuuden arvioon. Ainoastaan yhden koepuuerän kohdalla drone-mittaus tuotti paino-otantaa suuremman kiintotilavuuden. Näin tapahtui koepuuerän 9283 Lettland osalta, jossa drone-menetelmä arvioi pinomuodostelman 279,5 m³ eli 6,52 % paino-otantaa pienemmäksi. Poikkeavan mittaustuloksen syitä käsitellään luvussa 5.4.

TAULUKKO 9. Drone- ja paino-otantamittausten tulokset.

Laivaerä	Ptl.	Pinojen lkm.	Drone kehystilavuus	Drone kiintotilavuus	Paino-otanta kiintotilavuus	Ero, m³	Ero, %*
STK-1036	Kok 4 m	2	1027	472,4	491,4	-18,9	-3,85
STK-1016	Kok 4 m	1	2353	1082,4	1431,8	-349,4	-24,4
1769 Silva	Kok 3 m	6	9176	4220,9	4685,6	-464,6	-9,92
STK-1009	Kok 5 m	2	2801	1288,5	1467,4	-178,9	-12,19
9283 Lettland	Kok 6 m	4	9924	4565,0	4285,5	279,5	6,52

5.2 Pinomittauksen tulokset

Kaukaan puuterminaalissa vastaanotetut koepuuerät (STK-1036, STK-1016 ja STK-1009) oli mahdollista inventoida manuaalisesti perinteisellä pinomittausmenetelmällä. Pinojen pituudet sekä niiden kehystilavuuden mittauksessa käytettyjen pinonosien leveydet ovat esitettynä alla olevassa taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Pinomittauksissa käytettyjen pinonosien leveydet.

Laivaerä	Pinojen lkm.	Pituus, m	Pinonosan leveys, m
STK-1036	2	33,1 ja 34,8	2
STK-1016	1	92,4	5
STK-1009	2	63,3, ja 59,8	4

Pinomittauksen tulokset ovat esiteltynä taulukossa 11. Taulukossa vertaillaan pinomittauksella ja paino-otantamittauksella arvioitujen kiintotilavuuksien välistä eroa. Erotukset vaihtelivat -11,85 ja -4,33 prosentin välillä. Pinomittauksella arvioitu kiintotilavuus oli keskimäärin 7,3 prosenttia paino-otannan antamaa lukemaa pienempi. Pinojen STK-1016 ja STK-1009 osalta manuaalisella pinomittauksella saatu kiintotilavuus oli drone-mittauksen arvoa tarkempi. Käsin mitattuna saatiin tulokseksi tarkempi arvio pinojen kehystilavuudesta. Drone-menetelmä tulkitsi pinon kehystilavuuden keskimäärin 19,8 % pinomittauksella määritettyä kehystilavuutta suuremmaksi (taulukko 12). Pinomittaus antoi suuremman lukeman pinon kiintotilavuudelle. Selityksenä tähän on pinokohtaisen kiintotilavuusprosentin käyttäminen. Manuaalisessa pinomittauksessa jokaiselle pinolle määriteltiin oma pinokuutiokertoimensa pinokuutiotekijöiden perusteella. Dronella mitattujen kehystilavuuksien muunnoksessa käytettiin koivukuidun yleistä muuntolukua 0,46.

TAULUKKO 11. Pinomittausten tulokset.

Koe-erä	Pinomitta Kehystilavuus	Pinomitta kiintotilavuus	Paino-otanta kiintotilavuus	Drone Kiintotilavuus	Ero, m³	Ero, %	Muunnoskerroin
STK-1036	828,23	463,8	491,3	472,4	-27,5	-5,60	0,56
STK-1016	2069,2	1262,2	1431,8	1082,3	-169,6	-11,85	0,61
STK-1009	2301,36	1403,8	1467,4	1288,4	-63,6	-4,33	0,61

TAULUKKO 12. Dronella ja pinomitalla mitattujen kehystilavuuksien vertailu.

Koe-erä	Pinojen lkm.	Drone kehystilavuus	Pinomitta kehystilavuus	Ero, m³	Ero, %
STK-1036	2	1027	828,23	198,77	24,00
STK-1016	1	2353	2069,2	283,8	13,72
STK-1009	2	2801	2301,36	499,64	21,71

5.3 Keskimääräinen pinokuutiokerroin

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli muodostaa koivukuitupuupinojen kiintotilavuuden laskennassa käytettävä yleinen muunnoskerroin eli pinokuutiokerroin. Nykyisin käytössä oleva koivukuidun pinokuutiokerroin on 0,46. Taulukossa 13 esitetyt eräkohtaiset muunnoskertoimet on laskettu jakamalla paino-otannalla mitattu kiintotilavuus dronella mitatulla kehystilavuudella. Yleinen pinokuutiokerroin saatiin laskemalla kaikkien mittaerien muunnoskertoimien aritmeettinen keskiarvo. Tutkimuksessa mitattujen viiden koepuuerän keskimääräiseksi muunnoskertoimeksi muodostui 0,51.

TAULUKKO 13. Koepuuerien kehystilavuuden ja paino-otannan väliset muunnoskertoimet.

Laivaerä	Pinojen lkm.	Drone kehystilavuus	Paino-otanta kiintotilavuus	Muunnos-kerroin
STK-1036	2	1027	491,3	0,48
STK-1016	1	2353	1431,8	0,61
1769 Silva	6	9176	4685,6	0,51
STK-1009	2	2801	1467,4	0,52
9283 Lettland	4	9924	4285,5	0,43

5.4 Havaintoja mittauksista

Dronella mitatulla koivupinojen kehystilavuudella ja muunnoskertoimella 0,46 laskettu kiintotilavuus oli miltei kaikissa mittauksissa paino-otannan arvoa pienempi.

Tulos on vastoin tutkimuksen lähtöolettamusta, jonka mukaan drone-mittaus tuottaa todellisuutta suurempia arvioita pinojen kiintotilavuudesta. Mittaustulosten perusteella nykyistä muunnoskerrointa tulisi laskemisen sijaan korjata ylöspäin.

Ainoastaan 9283 Lettland-laivaerän drone-mittaus tuotti paino-otantaa suuremman kiintotilavuuden. Poikkeavalle mittaushavainnolle on monta selittävää tekijää. Kehystilavuuteen on vaikuttanut todennäköisesti pinojen poikkeuksellisen leveät pinovälit (katso liite 5). Pinot sisälsivät läpimitaltaan hyvin vaihtelevia runkoja. Lisäksi pinoissa oli selkeästi havaittavissa ladonnasta johtuvia rakoja sekä ristikkäin olevia pölkkyjä. Pinomuodostelma oli ladottu epätasaiselle maapohjalle ja osittain kallion päälle (kuva 7). Epätasainen maapohja toimii virhelähteenä mittauksessa, sillä drone määrittää kallion osaksi pinoa ja laskee sen mukaan kehystilavuuteen.

KUVA 7. Osittain kallion päälle ladottu pino. (Tikka 2021)

Pinoväleistä johtuva vaikutus kehystilavuuteen johtuu ilmakuvaukseen perustuvan menetelmän rajoitteista. Ilmakuvia tulkitseva ohjelmisto ei pysty mallintamaan pinojen välissä olevaa tyhjää tilaa realistisesti pinovälien varjoisuuden vuoksi. Pinovälien ollessa hyvin kapeita drone ei kykene havaitsemaan pinojen väliin jäävää kapeaa maakaistaletta. Mallinnusohjelma hahmottaa pinojen väliin

jäävän tyhjän alueen virheellisesti osaksi kehystilavuutta. Kuvattavan kohteen tulee olla riittävässä valossa, jotta mallinnusohjelma pystyy erottamaan havaintopisteen pinojen välistä ja tulkitsemaan kehystilavuuden realistisesti Pinovälien tyhjä tila jää siis katveeseen. Koejärjestelyissä havaittiin myös, että pinojen väliin jäävän tyhjän tilan koko ei ole vakio. Pinovälien leveydet vaihtelevat ladonnan sekä pölkkyjen mittojen mukaan.

Mittauksissa havaittiin, että drone-menetelmä mallintaa niin sanotut ”roikkuvat puut” väärin. Roikkuvilla puilla tarkoitetaan sellaisia runkoja, jotka ulottuvat pituudeltaan osittain pölkkyjen leikkauspinnoista koostuvan seinämän ylitse (kuva 8). Puuseinämän ylitse ulottuva rungonosuus erottuu selkeästi ilmakuvassa. Koska pinojen kuvaus toteutetaan kohtisuoraan pinojen yläpuolelta, jää ylimenevien rungonosien ja maanpinnan välinen alue katveeseen. Ilmakuvia mallintava ohjelmisto tulkitsee virheellisesti ylimenevän rungon ja maanpinnan välisen alueen kiinteäksi alueeksi osaksi kehystilavuutta. Roikkuvista puista johtuvan virheen suuruutta kehystilavuuteen ei pystytty tarkoin arvioimaan. Roikkuvien puiden määrä vaihtelee pinokohtaisesti ja riippuu pitkälti ladonnan toteutuksesta.

KUVA 8. Pinon reunan ylitse ulottuva, niin kutsuttu roikkuva pölkky. (Tikka 2021)

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITTÄMISIDEAT

6.1 Johtopäätökset

Kaikkia tutkimuksen alussa määriteltyjä tavoitteita ei pystytty täyttämään täydellisesti. Opinnäytetyöni toimii eräänlaisena johdantona fotogrammetrisen pinoinventoinnin aihepiiriin. Tutkimuksen aikana mittausmenetelmästä tehtiin mielenkiintoisia havaintoja sekä löydettiin useita kehittämistä vaativia osa-alueita, joista kerrotaan kehitysehdotuksia käsittelevässä luvussa 6.2.

Tutkimus oli laajuudeltaan hyvin rajoitettu käsittäen vain viiden koepuuerän mittaukset. Mittauksilla kerätyn aineiston koko ei riitä luotettavan johtopäätöksen vetämiseen yleistettävästä koivukuidun pinokuutiokertoimesta. Tilastollisessa tutkimuksessa virhemahdollisuuden riski kasvaa, kun tehdään johtopäätöksiä pienestä otosten joukosta (Holopainen & Pulkkinen 2008, 38). Tutkimuksessa mitattujen pinomuodostelmien pohjalta muodostetun pinokuutiokertoimen 0,52 käyttöön ottaminen kuukausi-inventointiin ei siis ole mielekästä.

Aiheen perusteellisempi tarkastelu edellyttää jatkotutkimuksia suuremmalla otoskoolla. Pinovälien vaikutusten selvittäminen ja yleisen pinokuutiokertoimen määrittäminen vaatii koemittauksia eri kokoisilla sekä erilaisiin pinomuodostelmiin ladotuilla koepinoilla. Jälkikäteen pohdittuna tutkimuksen koemittaukset olisi ollut viisainta toteuttaa mittaamalla sama puuerä useaan otteeseen siten, että puut ladotaan erilaiseen pinomuodostelmaan mittauskertojen välissä. Tällöin puuerän kiintotilavuuden pysyessä vakiona pystytään seuraamaan kehystilavuuden muuttumista tarkemmin.

Tutkimuksessa havaittiin, että drone-kuvauksella mitattu ja nykyisellä pinokuutiokertoimella 0,46 kerrottu kehystilavuus tuotti useimmiten paino-otantaa pienemmän arvion puuerän kiintotilavuudesta. Havainto on vastoin tutkimuksen lähtöolettamaa, jonka mukaan fotogrammetrinen mittaus antaa tulokseksi todellista suuremman arvioin pinojen kiintotilavuudesta. On huomioitava, että koejärjestelyjen mittaukset eivät ole täysin verrattavissa kuukausi-inventoinnin mittauksiin erisuuruisen mittakaavan vuoksi. Kuukausi-inventoinnissa mitattavan kuitupuun

tilavuus sekä kuvattavan alueen pinta-ala ovat huomattavasti suurempia kuin tutkimuksen koemittauksissa. Kuukausi-inventointien pinomuodostelmissa olevan tyhjän tilan sekä pinovälien vaikutus kehystilavuuteen on suurempi, jolloin vastaavasti kiintotilavuuden virhearvio on suurempi. Todennäköisimmin tämä selittää tutkimushavaintojen ja lähtöolettaman poikkeavuutta.

Pinojen väleihin jäävä tyhjä tila vaikuttaa dronella mitatun kehystilavuuden arvioon merkittävästi. Syynä tähän on drone-menetelmän heikkous katveeseen jäävän alueen mallintamisessa. Ohjelma tulkitsee alueen virheellisesti osaksi kehystilavuutta. Koepuuerässä, jossa ei ollut yhtään pinovälejä, yleisellä muuntokertoimella laskettu kiintotilavuus poikkesi merkittävästi paino-otannan arviosta. Pinovälien vaikutusta on vaikea eliminoida esimerkiksi omalla muunnoskertoimella, sillä pinojen väliin jäävän raon leveys vaihtelee pinokohtaisesti.

Yhteenvetona summaten innovatiivista tekniikkaa hyödyntävä drone-menetelmä on todettu toimivaksi mittausmenetelmäksi kuitupuuvarastojen inventoinnissa ja menetelmän jatkokehittämistä sen rajoitteiden hiomiseksi kannattaa jatkaa. Vanhaan pinomittausmenetelmään kuukausi-inventoinnissa on tuskin enää paluuta. Fotogrammetrisen menetelmän edut ilmenevät pienempänä henkilötyöpanoksen tarpeena sekä työturvallisuudessa. Raaka-ainevarastojen tilavuustiedon lisäksi ilmakuvauksella tuotettua aineistoa voidaan hyödyntää esimerkiksi kuljetusyrittäjien ja tehdasurakoitsijoiden työn ohjauksessa.

6.2 Kehittämisideoita

Merkittävin tilavuusarvion virheellisyyttä selittävä tekijä on drone-menetelmän taipumus arvioida pinojen kehystilavuus miltei 20 % käsin mitattua arviota suuremmaksi. Tämän vuoksi menetelmän mittaustarkkuus kaipaa vielä kalibrointia.

Mittaustarkkuutta pystytään parantamaan panostamalla laitteen paikannuksen tarkkuuteen. Fotogrammetrinen mittaus perustuu inventoitavan kohteen ja kuvanottopaikan sijainnin ja etäisyyden määrittämiseen. Kun kuvanottopaikan sijainti ja etäisyys tunnetaan, saadaan selville kuvattavan kohteen skaala. Hyödyn-

tämällä maastotukipisteitä mittauksessa eli georeferoimalla mitattava kohde tunnettuun koordinaatiojärjestelmään saadaan parannettua mittaustarkkuutta merkittävästi. Rumble Tools ei tällä hetkellä käytä maastotukipisteitä apuna mittausprosessissaan. Nykyisessä toimintamallissa dronen sijainnin seuraus lennon aikana tapahtuu tavallisella GNSS-satelliittipaikannuksella. GNSS-paikannustekniikan heikkoutena on sen riippuvaisuus satelliittien sijainnista. GNSS-paikannuksen sijaintiarvio voi heittää useita metrejä. Nykyisin uusimmat dronet käyttävät paikannuksessa RTK-tekniikkaa, joka yltää sijainnin määrityksessä senttimetrien tarkkuuteen. Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus perustuu maahan sijoitetun tukiaseman lähettämään korjaussignaaliin. Kehittyneemmän paikannustekniikan käyttäminen edellyttää erillisen tukiaseman sekä RTK-moduulilla varustetun dronen hankintaa. (Pix4D, 2017.) Kuukausi-inventoinneissa ja koemittauksissa käytetty DJI Mavic Pro -drone ei tue RTK-paikannustekniikkaa.

Yksi kokeilunarvoinen idea on pinojen inventointi Lidar-tekniikalla eli laserkeilaimella. Laserkeilaukseen perustuva menetelmä muistuttaa hyvin paljon fotogrammetrista menetelmää. Laserkeilauksessa ilma-alukseen kiinnitettävä Lidar-sensori lähettää kuvattavaan kohteeseen laserimpulsseja, jotka heijastuvat takaisin lähettimeen. Sensori laskee takaisin heijastuneiden säteiden perusteella kohteen sijainnin, muodot ja koon. Laserkeilausaineiston pohjalta muodostetaan pistepilvi, jossa yksi piste kuvaa säteen osumakohtaa. (Tammi 2018.) Laserkeilainjärjestelmissä on usein integroitu kamera, jolloin tulokseksi saadaan teksturoitu pistepilvi. Inventointimenetelmän etuina on hyvin tarkka etäisyyden mittaus sekä riippumattomuus valaistuksesta. Tällöin pinojen väliin jäävä tila on mahdollista mallintaa realistisemmin. Menetelmän tehokkuus on riippuvainen paikannuksen tarkkuudesta, eli GNSS-paikannus on tässäkin pullonkaulana. Lisäksi Lidar-sensorit ovat kooltaan ja massaltaan kamerajärjestelmiä suurempia ja edellyttävät lentoonlähtömassaltaan suuremman dronen hankinnan. (KMTK, 2018, 9–10.) Kyseisen tekniikan hyödyntämistä on pohdittu Rumble Toolsilla aikaisemmin, mutta ajatuksesta on luovuttu edellä mainittujen syiden sekä Lidar-laitteiston korkean hinnan vuoksi.

LÄHTEET

DJI. 2022. Mavic Pro. Luettu 21.4.2022. https://www.dji.com/fi/mavic

Hassinen, Alpo. 2013. UAV-lennokit – Kokemuksia UAV-laitteista. Itä-Suomen Yliopisto. PDF. Luettu 14.4.2022. https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/12542/urn_isbn_978-952-61-1205-3.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Holopainen, Martti & Pulkkinen, Pekka. 2008. Tilastolliset menetelmät. WSOY.
https://droneinfo.fi/fi/luvasta-vapaa-toiminta-avoin-kategoriassa
https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry

Jyväskylän yliopisto. 2015a. Empiirinen tutkimus. Luettu 6.4.2022.
https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/empiirinen-tutkimus

Jyväskylän yliopisto. 2015b. Määrällinen tutkimus. Luettu 6.4.2022.
https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus

Kansallinen maastotietokanta KMTK. 2018. Kuntien tuotantoprosessit: Selvitys RPAS-lentotyötoiminnan tuotantoprosessista. Luettu 16.4.2022.
https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2020/02/KMTK_kuntapro_Selvitys%20RPAS%20tuotantoprosessista_v11.pdf

Kiviniemi, Matti. Hujo, Samuli & Lindblad, Jari. 2006. Puukauppa: valmistelu, sopimus ja puutavaran mittaus. Metsäkustannus.

Luonnonvarakeskus. 2017. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista. Luettu 1.4.2022. Luonnonvarakeskuksen määräys puutavaran mittaukseen liittyvistä yleisistä muuntoluvuista: Ajantasainen määräys (22.12.2017)

Luonnonvarakeskus. 2022. Puutavaranmittaus: tehdasmittauksen valvonta, virallinen mittaus, muuntoluvut ja neuvonta. Luettu 5.4.2022.
https://www.luke.fi/fi/palvelut/puutavaranmittaus-tehdasmittauksen-valvonta-virallinen-mittaus-muuntoluvut-ja-neuvonta

Metsäteho. 2003. Kuitupuun pinomittaus. Maastotyöskentelyohje. Helsinki: Tukiprint Oy. Luettu 1.4.2022. https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/02/Kuitupuun_pinomittaus_ohje_uusi.pdf

Metsäteho. 2018a. Mittaus ja laatu. Mittausmenetelmäryhmät. Luettu 31.3.2022.
https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/johdanto/mittausmenetelmaryhmat/

Metsäteho. 2018b. Mittaus ja laatu. Kehystilavuus. Luettu 1.4.2022. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-maastossa/kuitupuun-pinomittaus/kehystilavuus/

Metsäteho. 2018c. Mittaus ja laatu. Kuitupuun pinomittaus. Luettu 1.4.2022. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-maastossa/kuitupuun-pinomittaus/

Metsäteho. 2018d. Mittaus ja laatu. Pinotiheystekijät. Luettu 2.4.2022. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-maastossa/kuitupuun-pinomittaus/pinotiheystekijat/

Metsäteho. 2018e. Mittaus ja laatu. Paino-otantamittaus. Luettu 4.4.2022. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-tehtaalla/paino-otanta

Metsäteho. 2018f. Mittaus ja laatu. Tilavuuden mittaus. Luettu 4.4.2022. https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-tehtaalla/paino-otantamittaus/tilavuuden-mittaus/

Pix4D. N.d. Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry. Luettu 12.4.2022. https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry

Pix4D. 2017. RTK vs PPK drones vs GCPs: which provides better results? Luettu 1.5.2022. https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison

Pix4D. 2019. Ground control points: why are they important? Luettu 16.4.2022. https://www.pix4d.com/blog/why-ground-control-points-important

Rakennustieto Oy. 2019. Fotogrammetrian käyttö rakennushankkeessa. Luettu 16.4.2022.

Rumble Tools Oy. 2021. Suullinen tiedonanto.

Sipi, Marketta. 2009. Puuraaka-aineen mittaus: mittausmenetelmät ja niiden perusteet. Helsinki: Yliopistopaino.

Tammi, Kalle. 3D-laserskannaus. ProDigiOUs-hanke. Luettu 2.5.2022. http://prodigious.tamk.fi/files/2018/05/3D-laserskannaus-koulutus.pdf

Traficom. 2022. Droneinfo. Luvasta vapaa toiminta Avoin-kategoriassa. Luettu 14.4.2022. https://www.droneinfo.fi/fi/luvasta-vapaa-toiminta-avoin-kategoriassa

Tervo, Jouko. 2017. Miehittämättömät kauko-ohjattavat ilma alukset sähköverkoston vianpaikannuksessa. Luettu 15.4.2022. https://energia.fi/files/1801/Miehittamattomat_kauko-ohjatut_ilmaalukset_verkostovikojen_paikannuksessa_2017.pdf

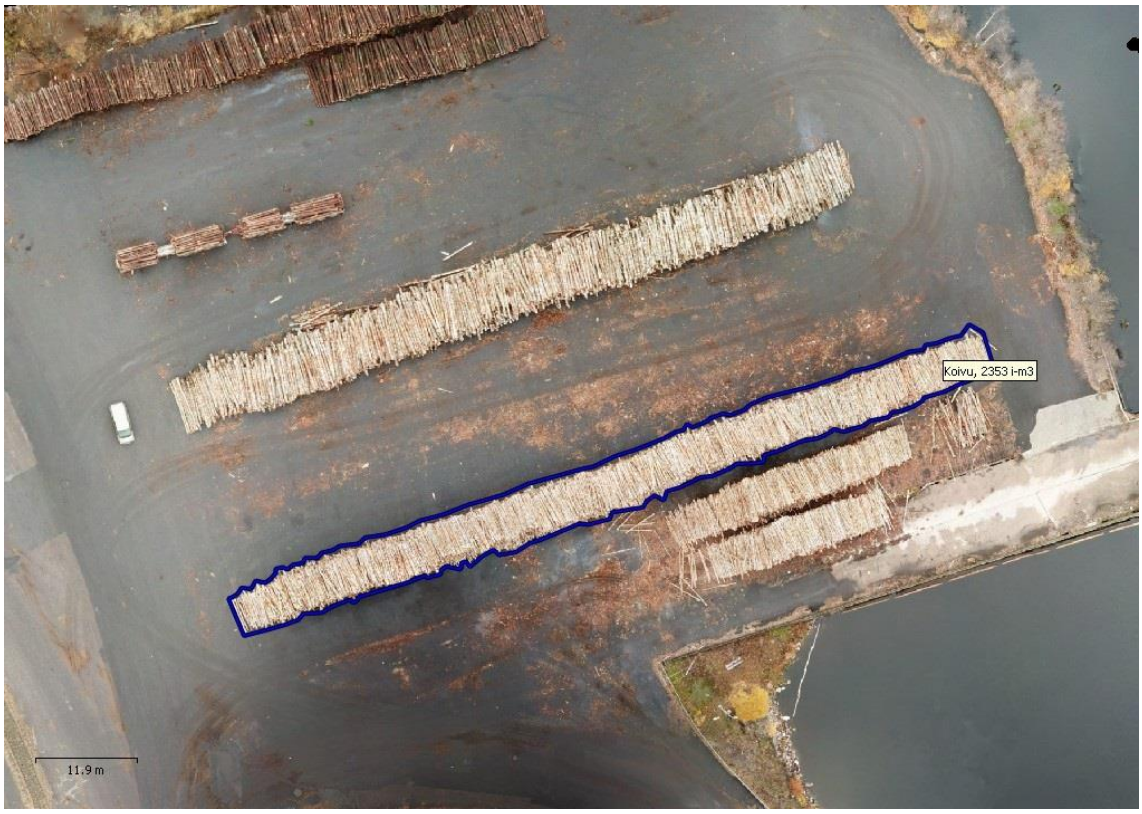
Vinni, Päivi. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – Mitä on fotogrammetria? Luettu 12.4.2022. https://sites.google.com/site/feaswindow/texts-and-maps/fotogrammetria

LIITTEET

Liite 1. STK-1036 koepuuerä esitettynä ortokuvassa.

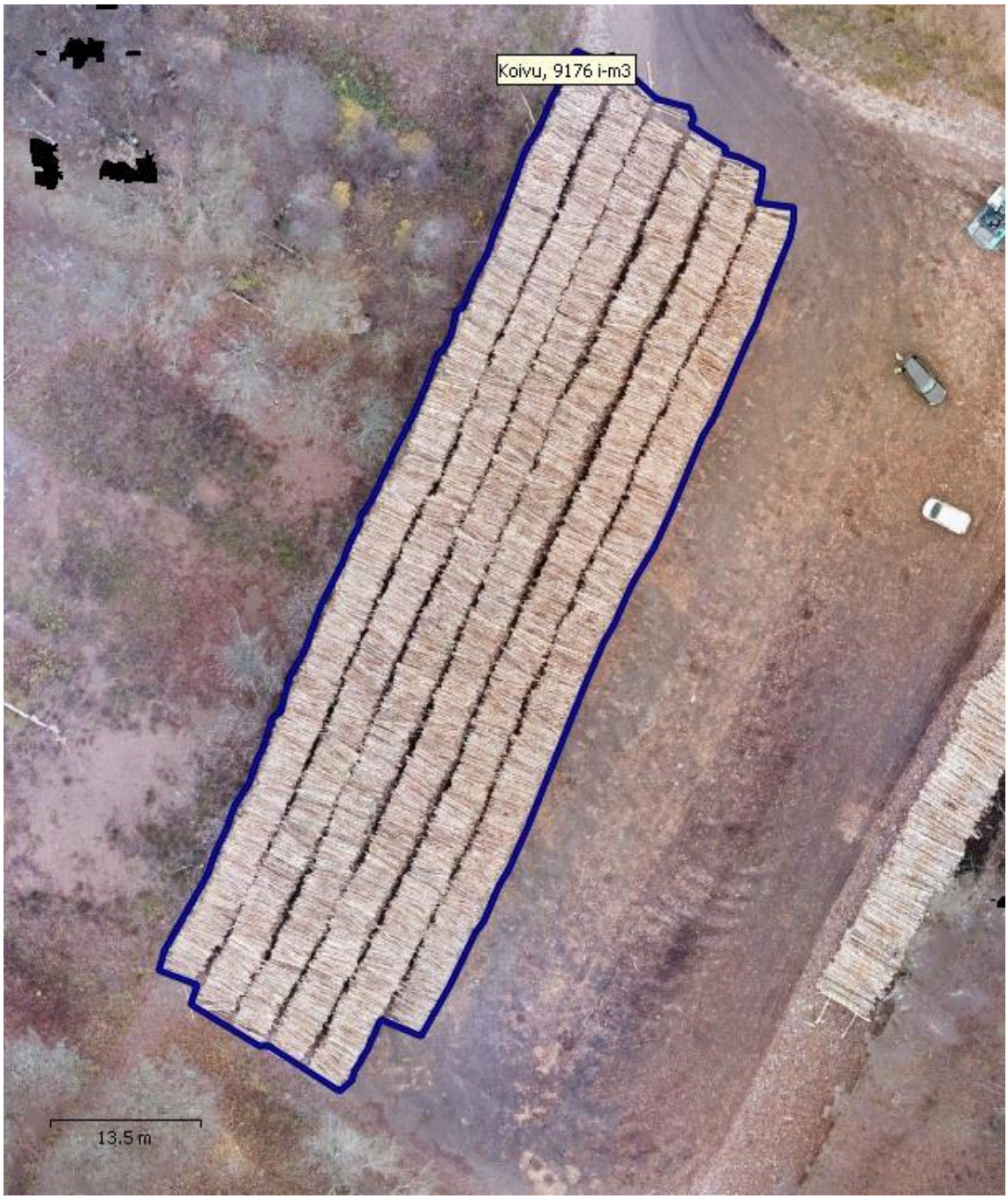
Lähde: Ilmakuvaus ja kuvien käsittely Rumble Tools Oy.

Liite 2. STK-1016 koepuuerä esitettynä ortokuvassa.



Lähde: Ilmakuvaus ja kuvien käsittely Rumble Tools Oy.

Liite 3. 1769 Silva koepuuerä esitettynä ortokuvassa.



Lähde: Ilmakuvaus ja kuvien käsittely Rumble Tools Oy.

Liite 4. STK-1009 koepuuerä esitettynä ortokuvassa.

Lähde: Ilmakuvaus ja kuvien käsittely Rumble Tools Oy.

Liite 5. 9283 Lettland koepuuerä esitettynä ortokuvassa.

Lähde: Ilmakuvaus ja kuvien käsittely Rumble Tools Oy.