

METSÄNARVIOINNIN KEHITYS

Metsävaratiedon satavuotinen historia

Annala Matti

Opinnäytetyö

Metsätalouden koulutusohjelma
Metsätalousinsinööri (AMK)

2021

Metsätalouden koulutusohjelma
Metsätalousinsinööri (AMK)

Tekijä	Matti Annala	Vuosi	2021
Ohjaaja	Kari Pasanen		
Toimeksiantaja	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oyj		
Työn nimi	Metsänarvioinnin kehitys Metsävaratiedon satavuotinen historia		
Sivumäärä	90		

Tämä vuosi on suomalaisen metsäninventoinnin juhlavuosi. Ensimmäinen valtakunnallinen metsien inventointikierrös aloitettiin vuonna 1921 eli tasan sata vuotta sitten.

Opinnäytetyö on referoiva kirjallisuuskatsaus, jossa tarkastellaan, miten metsävaratiedon hankkiminen ja analysointi ovat kehittyneet Suomessa sadan vuoden aikana ja miten kehitys jatkossa monipuolistaa ja uudistaa mittausta analysointia sekä tarkentaa metsävaratietoa.

Vuosikymmenien aikana mikään uusi innovaatio ei ole kyennyt kokonaan korvaamaan vanhoja menetelmiä. Uudet aineistot ja uudet analysointimenetelmät antavat edelleen tarkemman lopputuloksen, kun arvioinnissa käytetään monipuolisesti mukana myös vanhempia kartoitus- ja analysointimenetelmiä. Luonnollisesti kaikkein uusimpiin innovaatioihin ei pääse liikesalaisuuksien vuoksi tutustumaan, mutta tuoreimmat väitöskirjat ja julkaisut viitoittavat selkeän suunnan, mihin Suomen metsieninventointikierrökset ovat matkalla.

Kaukokartoitusdatan hankkiminen, kartoitusdatan tarkentuminen ja analysoinnin monipuolistuminen avaavat tulevaisuudessa uusia mahdollisuuksia metsävarojen inventoinneille. Hyperspektri-innovaatiot sekä fotonilaskentaan perustuvat keilaimet mullistavat metsävaratiedon mittausta jatkossa yhtä paljon kuin ilma- ja satelliittikuvien kuvien saanti 1940- ja 1960-luvuilla tai lentolaserkeilaukseen siirtyminen 2000-luvulle tultaessa. Metsistä jatkossa saatavat toisen keilauskierroksen 3D-aineistot tuovat lisäksi mahdollisuuksia tarkastella esimerkiksi puuston kasvua tai metsätuhojen vaikutuksia laajoilla alueilla entistä tarkemmin. Metsävaratieto muuttuu jatkossa 4D-maailmaan (x,y,z,t) ajan tuodessa paikkatietoon neljännen ulottuvuuden. Myös metsien käyttötarpeet monipuolistuvat jatkossa ja erilaiset monimuotoisuuden ja -käytön arvioinnit tarvitsevat entistä monipuolisempaa mittausaineistoa.

Metsänarviointi on murroksen edessä. Lopulta kaiken ratkaiseva raha asettaa muutokselle tiukat raamit. Jalostetulle tiedolle on oltava tarve ja tuloksille löydyttävä maksaja.

Avainsanat

kaukokartoitus, laserkeilaus, metsävarainventointi, VMI

Author	Matti Annala	Year	2021
Supervisor	Kari Pasanen		
Commissioned by	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd		
Subject of thesis	Development of forest assessment One hundred years of history of forest resource information		
Number of pages	90		

This year is the anniversary year of the Finnish forest inventory. The first national forest inventory round was started in 1921, exactly one hundred years ago.

The thesis is a referential literature review, which examines how the acquisition and analysis of forest reserve data has developed in Finland over a hundred years and how the development will further diversify and renew measurement analysis and refine forest resource data.

Over the decades, no new innovation has been able to completely replace old methods. New data and new analysis methods still give a more accurate result when older mapping and analysis methods are also used in a variety of ways. Of course, you cannot get acquainted with the latest innovations due to trade secrets, but the latest dissertations and publications point to a clear direction in which Finnish forest inventory rounds are heading.

Acquisition of remote sensing data, refinement of mapping data and diversification of analysis will open up new opportunities for forest resource inventories in the future. Hyperspectral innovations and photobased beacons will revolutionize the measurement of forest resource data in the future as much as the acquisition of aerial and satellite imagery in the 1940s and 1960s or the transition to aerial laser scanning in the 21st century. In addition, the 3D data from the second round of scanning in the future will provide opportunities to examine, for example, the growth of trees or the effects of deforestation in the large areas. In the future, forest resource information will change into the 4D world (x,y,z,t) as time brings a fourth dimension to location information. The needs for forest use will also diversify in the future, and various assessments of diversity and use will require even more diverse measurement data.

Forest assessment is facing a change. In the end, the decisive factor in everything is setting a tight framework for change. There must be a need for the processed data and a payer for the results.

Key words forest inventory, laser scanning, remote sensing, VMI

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	METSÄVARATIEDON TARPEET	9
2.1	Strateginen suunnittelu	10
2.2	Taktinen suunnittelu ja operatiivinen metsäsuunnittelu.....	11
3	METSÄNMITTAUS JA VMI SATA VUOTTA SUOMESSA	13
3.1	Metsätyyppiteoria.....	13
3.2	Metsikkö- ja kuvio inventointiperusteena	13
3.3	Valtakunnallisten metsien inventointikierrosten alku.....	14
3.4	Satelliittikuvat.....	15
3.5	Digitalisaation mahdollisuudet	15
3.6	Laserkeilaus kaukokartoituksessa	16
3.7	VMI kehittyi	17
3.8	VMI tulokset.....	17
4	METSÄVARATIETOAINEISTON HANKINNAN KEHITYS	20
4.1	Maastossa kerättävä aineisto	20
4.2	Ilmakuvat	21
4.2.1	Näkyvän valon kuvat	22
4.2.2	Lähi-infra- eli väärävärικuvat	22
4.3	Satelliittikuva.....	25
4.4	Tutkasatelliittikuva	29
4.5	Laserkeilaus.....	31
4.5.1	ALS-keilaus	31
4.5.2	TLS/MLS-keilaus.....	35
4.6	Lennot ja dronet	36
4.7	Puhelinsovellukset	37
4.8	Spektri- ja hyperspektrikamerat	42
5	METSÄVARATIEDON ANALYSOINNIN KEHITYS	45
5.1	Inventointiin sopivien kaukokartoitusmenetelmien yhteenveto.....	46
5.2	VMI-koealadatasta valtakunnan puustotieto ja VMI-rasterikartta	47
5.3	Laserkeilausaineistosta kuviotason metsävaratieto	49
5.3.1	Aluepohjainen tulkinta harvapulssiselle ALS-aineistoille	51

5.3.2	Yksinpuintulkinta tiheäpulsiselle ALS-aineistoille	53
6	METSÄNARVIOINNIN JA METSÄVARATIEDON UUSIMMAT TYÖKALUT	59
6.1	Dronet metsän arvioinnissa	60
6.1.1	Dronet metsätilojen arvioinnissa.....	60
6.1.2	Dronet korjuujälkiä arvioimassa.....	61
6.2	Metsävaratiedon ajantasaistaminen	64
6.3	Korjuujäljen automaattiset kontrollit	65
6.4	TLS/MLS-keilauksen hyödyntäminen mallinnuksessa	70
6.5	Hyperspektrikamerat kehittämässä uutta.....	71
6.6	Tekoälyn hyödyntäminen.....	72
6.7	Fotonilaskentaan perustuva keilaus.....	73
6.8	Uusi metsä- ja luontotietojärjestelmä käyttöön 2022.....	75
7	METSÄVARATIETO TULEVAISUUDESSA	77
8	POHDINTA	79
	LÄHTEET.....	82

ALKUSANAT

Kiitos Teknologian tutkimuskeskus VTT:lle mielenkiintoisesta ja monipuolisesta opinnäytetyöaiheesta ja mahdollisuudesta opiskella työn ohessa. Jyrki, Matti, Tapio, Jussi, Teemu, Tuomas ja Jari, kävimme monet mielenkiintoiset keskustelut tämänkin projektin puitteissa, huomaten, kuinka paljon loppu viimein hyvinkin erilaiset aihealueet tukevat toisiaan ja yhdistelemällä sopivasti eri osaamisia, saadaan aikaan uusia näkökulmia.

Kiitos myös Lapin AMK:lle. Ilman monimuoto-opiskelumahdollisuutta moni haave jää pelkälle suunnitelma-asteelle. Kiitokset opettajille mielenkiintoisista, mukansatempaavista kursseista ja kannustuksesta, mutta myös ymmärryksestä, ettei töiden ohella opiskellessa kaikki mene välttämättä suunnitellun aikataulun mukaisessa järjestyksessä. Sanotaan, että on monta tapaa rakentaa hirsitalo ja lopputulos on hyvä. Sama sääntö pätee aikuisopiskelussakin.

Kiitokset RA64M16S-saapumiserän opiskelijat monipuolisista keskusteluista niin iltaluentojen chattiruuduilla kuin lähijaksoilla pienryhmissä tai taukonuotioilla. Meillä oli joka paikassa hyvähenkinen jutustelu käynnissä aiheesta ja etenkin aiheen vierestä.

Opiskelu aikuisiällä, perheellisellä ja työssäkäyvällä, ei ole koskaan pelkkä yksilösuoritus. Kiitokset vaimoni Anu ja lapset Taneli, Tatu ja Iita kaikesta ymmärryksestä, venymisestä ja tuesta, jota savottani on vaatinut. Tämän urakan jälkeen lupaan, etten ryhdy opiskelemaan...ainakaan vähään aikaan.

Kiitokset Karille, opinnäytetyöni ohjaajalle, hyvähenkisistä palavereista ja mielenkiintoisista keskusteluista metsävaratiedon, mittaamisen ja analysoinnin tulevaisuuden visioista ja mahdollisuuksista. On mielenkiintoista nähdä jatkossa, miten kaikki muuttuu.

Oulussa 19.4.2021

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ALS	Airborne Laser Scanning, laserkeilaus lentokoneesta
GIS	Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä
k-NN	k-Nearest Neighbor, k-lähimmän naapurin menetelmä
MLS	Mobile Laser Scanning, laserkeilaus mobiilialustalta
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping, jatkuvatoiminen paikantaminen ja kartoitus
SPAD	Single Photon Avalanche Diode, fotonilaskentakennno
TLS	Terrestrial Laser Scanning, maastolaserkeilaus
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus
VMI	Valtakunnan metsien inventointi

1 JOHDANTO

Suomalaisia on aina kiehtonut metsien mahdollisuudet ja huoli siitä, ettei metsiä hukata liian suurilla hakkuilla. A. K. Cajander kehitti 1900-luvun alussa metsätyyppiteorian, jossa pelkällä kasvilajien yleisyyden perusteella voitiin luokitella metsämaiden hyvyys, puuntuottokyky. Ilvessalo puolestaan aloitti ensimmäinen koko valtakunnan metsien inventointiin tähtäävän inventointikierroksen 1920-luvulle tultaessa vuonna 1921. Valtakunnan metsien inventointi, VMI1, oli valmistuttuaan vuonna 1923 samalla ensimmäinen laatuaan koko maailmassa. Laaja-alaista metsänarviointia on siis tehty Suomessa jo sata vuotta. Toisaalta sataan vuoteen sisältyy myös merkittävä osa teollistumisen ja tekniikan kehittymisen aikakaudesta ja yllättäen myös Albert Einstein on ollut vuonna 1917 kehittämässä tämän päivän metsäarviointeja – samalla aikakaudella Ilvessalon ja Cajanderin kanssa.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n projektissa, Digitaaliset metsänarviontimenetelmät puunkorjuun tehostajina, DigInventory, kehitetään eri menetelmiä, joita voisi hyödyntää metsätalouden eri osakokonaisuuksissa (esim. metsänmittaus ja puunkorjuu eri vaiheineen). Tämä opinnäytetyö suunniteltiin osaksi Laserkeilaus ja SLAM puunkorjuun tehostajina tehtäväkokonaisuutta. Projektin alkuvaiheessa pohdittiin metsänmittauksen nykytilaa ja opinnäytetyön teemaksi muodostuikin metsänmittauksen tilannekartoitus.

Opinnäytetyön aiheeseen perehtymisen jälkeen kävi selväksi, että metsänarviontien tarkastelu jää pintapuoliseksi, jos tutkitaan vain uusimpia valmistuneita tutkimuksia tai pyritään selvittämään meneillään olevia tutkimushankkeita. Opinnäytetyö piti rajata myös koskemaan vain kaukokartoitusmenetelmien kehitystä. Uusimmat innovaatiot ja analysointimenetelmät muuttavat kuitenkin koko metsänarvointiketjua, joten aihetta on syytä tarkastella kokonaisuutena. Uusimmilla ainesitoilla ja analysointimenetelmillä kyetään jatkossa tuottamaan jopa kasvupaikan luokitteluun johtavia tunnuksia. Ympyrä sulkeutuu ja analysointiteemoissa päästään jopa Cajanderin aikaisiin aiheisiin, eli metsämaan puuntuotoskyvyn arviointiin - mutta ihan uusin menetelmin.

2 METSÄVARATIEDON TARPEET

Suunnittelulla on keskeinen rooli metsätalouden päätöksenteon prosesseissa. Metsävaratietoa tarvitaan strategiseen, taktiseen ja operatiiviseen suunnitteluun. Ne muodostavat toisiinsa nivoutuen kokonaisuuden tarkastelun ja toimintaketjun, jossa yhdistyvät metsän omistamisen erilaiset tavoitteet, metsän mahdollisuudet sekä luonnon tai yhteiskunnan asettamat rajoitteet eli ottaen huomioon metsien kestävän käytön tarkastellen niin ekologista, sosiaalista kuin taloudellistakin kestävyyttä. Strateginen suunnittelu toimii ikään kuin eri piirteistä koostuvana ohje-
nuorana tuottaa erilaisia toimenpiteitä, jotka kohdistuvat metsäalueeseen. Toimenpiteiden käytännön toteutussuunnittelu on puolestaan taktista suunnittelua ja työkohtaiset ohjeistukset puolestaan operatiivista suunnittelua. (Niemi, Mäkinen, Viitala & Lumperoinen 2020, 11.)

Kaikissa suunnittelun osa-alueissa metsävaratiedosta prosessoidaan käyttötarkoitukseen sopivaa aineistoa päätöksenteon tueksi: tehdään erilaisia laskelmia ja haetaan ratkaisuvaihtoehtoja, joilla tavoitteet voidaan saavuttaa. (Niemi ym. 2020, 12). Tähän saakka suurin tarkastelun intressi on ollut puuntuotannon taloudellinen kestävyys, mutta jatkossa myös muut metsiin liittyvät ekosysteemi-
palvelut arvotuttavat omat osansa ja suunnittelu monitahoistuu. (Niemi ym. 2020, 17). Metsävaratiedon on oltava tarkkaa ja harhatonta, jotta päätökset ja toimenpiteet kohdentuisivat optimaalisesti ja metsänomistajan tavoitteet toteutuisivat. Maastotyön vähentyessä etämetsänomistamisen lisääntyessä ja puukaupan päättäminen ilman maastokäyntiä voivat jatkossa lisääntyä, mikä puolestaan antaa mahdollisuuden käyttää metsävaratietoa jopa tarkoituksellisesti väärin. Virheet esimerkiksi pääpuulajin suhteen voivat johtaa leimikkotarjouskilpailussa ”väärän” tarjouksen voittamiseen ja sitä myötä pienempään hakkuutuloon. (Kangas ym. 2019, 15. Haara & Kangas 2019, 5–11.)

Inventointimenetelmien kehittymisen lisäksi metsien- ja luonnonkäytön suunnittelusta on tullut entistä tarkempaa, monitavoitteisempaa ja asiakaslähtöisempää. Se aiheuttaa jatkossa haasteita myös metsien inventointikäytäntöihin. Metsänomistajien joukko on tavoitteineen entistä kirjavampaa samoin kuin metsänkäsitelymuodot ovat aiempia monipuolisempia. Tämä on otettava huomioon jo metsiä

inventoitaessa, jotta metsistä kerättävä data on riittävän tarkkaa ja jalostuskel-poista ja palvelisi erilaisia käyttötarkoituksia. (Hokajärvi 2012, 36–40.)

2.1 Strateginen suunnittelu

Metsäsuunnitteluprosessi alkaa strategisen metsäsuunnitelman laadinnalla. Strategisen suunnittelun lähtökohta voi olla suuralueellinen, valtakuntaa tai jopa koko maailmaa koskeva. Pienimmillään se luo metsänkäsittelynperusteet yhden metsäomistajan yhdelle metsätilalle tehtävään metsäsuunnitteluun. Strateginen suunnitteluvaiheen yksi oleellinen osa on sijoittaa metsän puusto aikajanelle ja erilaisin simulointityökaluin (esim. Mela- ja Motti-ohjelmistot) tuottaa kasvumallien avulla metsälle kasvu- ja kehitysarviot tuleviksi vuosiksi. Simuloinnin jälkeen voidaan valita optimaalisin toteutustapa ja -ajankohta eri tavoitteiden toteuttamiseksi. Optimointi ottaa huomioon päätöksentekijän erilaiset arvot ja tavoitteet sekä niiden painotukset ja voi käyttää apuna optimointityökaluja (esim. Mela-, Monsu- ja Iptim-ohjelmistot). Näin esimerkiksi vuosittainen hakkuutavoite ja kasvavirta, käytettävät metsänhoitomenetelmät ja niiden vaikutukset, hakkuiden intensiteetin ja ajoituksen vaikutukset puustoon kehitykseen, käytönrajoitukset ja halutut suojelulliset määrät toimenpiteineen sekä muut metsien käsittelyyn tulevat huomioonotetuiksi metsäsuunnittelun linjauksissa. (Niemi ym. 2020, 19–24.)

Laaja-alainen strateginen suunnittelu tarvitsee luonnollisesti laaja-alaisia metsäinventointeja. Tällaista metsävaratietoa tuottaa esimerkiksi valtakunnan metsien inventointiohjelma, VMI. Se tuottaa koko maata kattavan, maastossa mitattavan koealaverkoston avulla aineistopankin, josta puusto- ja kasvupaikkamallien laskennoilla tuotetaan koko maata kattava metsävaratieto. Laaja-alaisessa strategisessa suunnittelussa VMI-koealadatatista tuotetaan simuloimalla koealapuustolle kasvulaskelmat, joiden perusteella voidaan laskea kokonaispuuston kasvua ja hakkuumahdollisuuksia, metsävarallisuuden muutoksia, seurata suurten alueiden maankäytön muutoksia, monimuotoisuuden kehitystä sekä metsien terveyttä ja luoda toimenpidevaihtoehtoja haluttuihin tavoitteisiin pääsemiseksi. (Kangas ym. 2019, 5.)

Nykyisin myös esimerkiksi hiilitaselaskelmat kuuluvat läheisesti VMI-puustotiedoista johdettaviin tunnuksiin. Simuloimalla metsien kehitystä ja metsien käyttöä voidaan arvioida myös ihmisen vaikutusta metsien käytön näkökulmasta ilmastomuutokseen ja monimuotoisuuden säilymiseen. Etenkin ilmastomuutos tuo paineita ja kritiikkiä metsien käytölle ja vaikutusten arvioinneissa metsävaratietojen tarkkuus mutta myös tarkastelun monipuolisuus tuovat mittaukseen ja simuloiteihin uusia tarpeita laskea ja ennustaa metsien muutoksia niin Suomessa kuin globaalistikin. Aineistoja käytetään esimerkiksi kaupunkien maankäyttöä suunniteltaessa. (Rasinmäki & Känkänen 2014, 16–24.)

Pienialainen strateginen suunnittelu on tyypillisimmillään metsätilalle laadittavassa metsäsuunnitelma. Suunnitteluaineistona käytetään nykyisin Metsäkeskuksen laserkeilausaineistosta tuottamaa metsävaratietoa, sekä maastotyönä kerättyä tarkempaa metsätילוkohtaista metsävaratietoa. Strategisessa suunnittelussa otetaan huomioon metsätilan mahdollisuudet ja metsänhoidolliset tarpeet, metsänomistajan tavoitteet metsänsä suhteen sekä tehdään myös suojelun vaatimusten arviointia. Valmis metsäsuunnitelma sisältää metsävarojen nykytiedot, puuston kasvuarviot, hakkuumahdollisuudet ja metsänhoitotarpeet sekä luonnon monimuotoisuuteen liittyvät tiedot. (Niemi ym. 2020, 16.)

2.2 Taktinen suunnittelu ja operatiivinen metsäsuunnittelu

VMI-koealadatoista lasketut puustotiedot jalostuvat monilähdeinventoinnin kautta suuraluetason VMI-rasteritiedoksi, jota puolestaan käytetään laajojen alueiden strategisen suunnittelun jatkumossa eli taktisessa ja operatiivisessa metsäsuunnittelussa. Näin esimerkiksi teollisuusinvestointien ajan ja paikan määrittämisessä voidaan käyttää suurten alueiden metsävaratietojen tulevaisuuden kehityssennusteita, jotka simuloidaan VMI-rasteritiedosta. Myös uusi metsitystuki puuttomille alueille on strategisen metsäsuunnittelun tuottama keino lisätä samalla kertaa sekä metsäpinta-alaa, että hiilensidontaa. Taktinen suunnittelu metsityksessä hakee puolestaan sopivia metsityskohteita ja operatiivisessa suunnittelussa laaditaan ohjeistukset toimenpiteiden toteuttamiseen, jotta esimerkiksi ympäristösuojellulliset ja maisemalliset näkökohdat huomioidaan. (Niemi ym. 2020, 12–16.; Suomen metsäkeskus 2021a.)

Metsätilatason suunnittelussa strategisen suunnittelun luoma metsäsuunnitelma tai hakkuusuunnite jalostuu taktisessa suunnittelussa toteutettaviksi leimikoiksi. Taktisessa metsäsuunnittelussa päätetään missä järjestyksessä toimenpiteet toteutetaan. Tässä vaiheessa tarvitaan monesti myös maastossa tehtäviä tarkastuksia, pitävätkö metsävaratiedot paikkansa ja samalla leimikoiden rajauksia voidaan tarkentaa. Taktinen suunnittelu voi pohjautua myös hilatason inventointitietoon, jolloin suunnittelu tehdään yhdistämällä hilasoluja toimenpidekuvioksi. (Niemi ym. 2020, 16.)

Taktinen suunnittelu voi johtaa myös suoraan toteutuksiin ilman operatiivista suunnittelukierrosta, mikäli taktisessa suunnittelussa on tehty tarpeelliset maastotyöt huomioiden jo operatiivisen tason tarpeet. Operatiivisen suunnittelun tehtävä on luoda töiden toteuttajille yksityiskohtaiset työohjeet työvaiheohjauksiin, jotta esimerkiksi erilaiset sertifikaatit ja ympäristönsuojelulliset teemat tulevat huomioituiksi. (Niemi ym. 2020, 16.)

3 METSÄNMITTAUS JA VMI SATA VUOTTA SUOMESSA

3.1 Metsätyypiteoria

Suomalaisen metsäntutkimuksen pioneerina voidaan pitää A. K. Cajanderia (1879–1943), joka tutkimustensa jälkeen julkaisi vuonna 1925 Metsätyypiteorian. Siinä metsien luokittelu perustuu luonnon omaan kasvillisuuden järjestäytymistapaan, jossa keskinäinen kilpailu ja sitä kautta kasvien esiintymisrunsaus ja esimerkiksi eri puulajien menestyminen eri paikoissa johtuu vain kasvupaikassa olevista ominaisuuksista ja johtavat näin ollen samanlaiseen järjestäytymiseen ihmisen tai luonnon aiheuttaman häiriötekijän aiheuttaman muutoksen jälkeenkin. (Cajander 1925, 19–28.)

Samanlaista kasvillisuuteen perustuvaa luokittelua yritettiin tutkia myös muualla maailmassa mutta laihoihin tuloksiin. Suomen metsissä luokittelu jäi käyttöön ja metsämaamme luokitellaan nykyäänkin viiteen metsätyyppiin, joille on muodostuneet omat metsien hoito- ja käyttötavat. Samalla luotiin myös pohja luonnon monimuotoisuus -käsitteelle. Myöhemmin metsätyypitystä on tarkennettu alueellisilla kasvupaikkatyypeillä, koska metsäkasvillisuudessa on isot maantieteelliset eroavaisuudet. Kasvupaikkatyyppejä on nykyään käytössä 27 erilaista kangasmaatyyppiä ja 27 erilaista lehtotyyppiä. Cajanderin kehittämä luokitusjärjestelmä toimii edelleen perustana metsien käsittelyn operatiivisen tason suunnittelussa ja toteutuksissa. (Ruuhijärvi 2009, 159–161.)

3.2 Metsikkö- ja kuvio inventointiperusteena

Pressler ja Judeich loivat nykymuotoisen metsikkötalouden perusteet jo 1800-luvun loppupuolella Saksassa, jotka otettiin Suomessa käyttöön 1907. Menetelmän perusajatuksena on, että metsää on käsiteltävä puulajin biologisten vaatimusten ja kasvupaikan mukaan. Metsä jaetaan metsiköihin (kuvioihin) ja jokainen niistä tutkitaan erikseen luoden sille edullisin uudistamisajankohta kasvupaikan ja puulajin suhteen. Kuvioittainen arviointi suoritetaan maastossa muutamilla mitauksilla, jossa saadaan kuviolle määritettyä kasvupaikka ja puustotunnukset. Samalla arvioidaan kuvion hakkuu- ja metsänhoitotarpeet. Kuviolta mitattavat puustotunnukset ovat runkoluku, pohjapinta-ala, keskiläpimitta, keskipituus ja

keski-ikä. Tunnukset mitataan puulajeittain ja jaksoittain. (Koivuniemi 2003, 11–12.)

On huomattava, että nykyisin käytössä oleva puuston pohjapinta-ala -tunnus ja sen mittaamiseen kehitetty relaskooppi keksittiin vasta 1957. Relaskoopin kehittäväntalainen Bitterlich ja keksintö on edelleen yksi suurimmista metsätieteenalaan vaikuttaneista keksinnöistä. Metsikkötaso ja kuvio inventointi- ja toimenpideyksikkönä ovat säilyttäneet paikkansa yli sata vuotta huolimatta kartoitus- ja analysointimenetelmien kehityksestä. (Kuusela 1960, 9–19.; Koivuniemi 2003, 11–14.)

3.3 Valtakunnallisten metsien inventointikierrosten alku

Ensimmäinen valtakunnan metsien inventointikierrros, VMI1, puolestaan aloitettiin Yrjö Ilvessalon johdolla vuonna 1920 (VMI1, 1921–1924). Se oli myös samalla maailman ensimmäinen tilastolliseen otantaan perustuva laajamittainen metsien inventointi. Ensimmäisillä inventointikierröksillä (VMI1–VMI4, vuosina 1920–1963) VMI toteutettiin linjamittauksin, joissa mittauskoealat sijoituivat maastoon suorille linjoille ja lounas-koillinen -suunnassa kulkeneet mittauslinjat käveltiin läpi samalla tehden arvioita ja havaintoja linjalle osuneista metsiköistä. (Luke 2010.)

Ajanjaksolla ennen lentokoneita niin VMI-tason metsävaratietojen kuin kuvioittainkin arviointi pohjautui jalkatyönä tehtävään metsien mittaukseen ja havainnointiin. VMI1–VMI4 olivat suorille linjoille tehtäviä arviointikävelyjä, VMI5 suoritettiin epäyhteneväisin, suorakaiteen muotoisin arviointilinjoin ja Pohjois-Suomessa inventointiin otettiin avuksi mustavalkoiset ilmakuvat. (Luke 2010.)

Visuaalinen ilmakuvatulkinta toi uusia mahdollisuuksia viedä VMI-tason metsävaratietoa pienemmille pinta-aloille palvelemaan operatiivisen tason metsäsuunnittelua. Ilmakuvatulkinta on ollutkin metsänarvioinnin tärkeä työkalu jo 1940-luvulta alkaen. Jo VMI5:ssä ilmakuvilta paikannettiin mitattavia/mitattuja koealoja ja niiden metsävaratietoja yleistettiin muille samalta näyttävälle ilmakuvavuuduille. Myös kuvioittaisessa metsänarvioinnissa ilmakuvista saatava hyöty oli kiistaton,

kuviointi nopeutui ja puulajitulkinta väärävärικuvien myötä tarkentui. VMI6:n uudistus oli koealojen sijoittaminen rypäisiin, jotka ehdittäisiin mitata yhden työpäivän aikana. (Luke 2010.; Holopainen ym. 2015, 35.)

3.4 Satelliittikuvat

Automaattisten kuvatulkingojen kehittäminen luonnonvarojen inventointiin käynnistettiin heti ensimmäisen tähän tarkoitukseen kehitetyn satelliitin (Landsat 1972) laukaisun jälkeen. Satelliittikuvia käytettiin valtakunnan metsäinventoinneissa ensimmäisen kerran inventointikierröksellä VMI8. Satelliittien mukaantulo toi uudet mahdollisuudet suurten metsäalueiden mittauksiin ja metsävaroista pysyttiin myös ensimmäistä kertaa laatimaan metsävarakarttoja. VMI8:n koealoista osa perustettiin kiinteiksi, jolloin voitiin mitata myös metsävarojen muutoksia tarkemmin. (Luke 2010.)

Metsikkötason metsäsuunnitteluun satelliittikuvien tarkkuus ei kuitenkaan riittänyt ja se pohjautui hyvin pitkään, liki kuusikymmentä vuotta, ilmakehään ja maastossa tehtyihin kuviotason mittauksiin. Uusia analyysimenetelmiä kyllä kehitettiin, mutta metsävaratieto pysyi pitkään tilastoyhteenvetolaskelmien ja erilaisten kaksikulotteisten teema- ja kuviokarttojen esittäminä kokonaisuuksina. (Holopainen ym. 2015, 42–43.)

3.5 Digitalisaation mahdollisuudet

Digitaalitekniikan mukaantulo 1980-luvulla monipuolisti geoinformatiikan ja mahdollisti myös metsäinventoinneissa uudet tuulet maailman siirtyessä todelliseen tietokoneaikaan. Digitaaliset kamerat paransivat kuvien radiometristä tarkkuutta samalla kun kuvien spatiaalinenkin tarkkuus parani. Aineistojen datansiirto nopeutui ja tietotekniikka mahdollisti erilaisten puustomallinnusten ja laskentojen kehittämisen. (Holopainen ym. 2015, 13, 34–35.)

Satelliittipaikannusjärjestelmä (GPS, Global Position System) mullisti puolestaan geoinformatiikan 1990-luvun loppupuolella (Holopainen ym. 2015, 29). Kartat tarkentuivat, paikkatiedon esittäminen monipuolistui ja tiedon kerääminen täsmentyi tarkan, reaaliaikaisen paikantamisen myötä (Holopainen ym. 2015, 29–

31). Kaukokartoituksen tarkempiin puustomittauksiin kaivattiin kuitenkin jatkossa tarkempaa puiden pituustietoa, eikä sitä pelkillä 2D-kuvaustekniikoilla kyetty tuottaa. Ilkka Korpela kehitti 2D ilmakuvista digitaaliseen fotogrammetriaan perustuvan yksittäisten puiden mittaumenetelmän ensimmäisinä askelina kohti metsien 3D-mittauksia vuonna 2004. Ilmakuvien ongelmana oli kuitenkin edelleen maanpinnan huono erottuminen peitteisessä metsässä (Kangas 2019, 4–5.; Holopainen ym. 2015, 43–45.; Korpela & Välimäki 2007, 403–405.).

3.6 Laserkeilaus kaukokartoituksessa

Lasersäde keksittiin 1960-luvulla ja sen käyttö etäisyyden mittaamiseen toi suuren kehitysharppauksen mittaamiseen. Keksintöä kehitettiin alusta saakka myös erilaisiin mallinnus- ja mittaustarkoituksiin, mutta kesti lähes 40 vuotta ennekuin se mahdollisti metsävaratiedon muuttumisen kaksiulotteisesta datasta kolmiulotteiseksi. Lasermittausta ja -keilaimia kehitettiin tätä tarkoitusta varten pitkäjänteisesti, mutta vasta 2000-luvulle tultaessa lentokoneesta suoritettava laserkeilaus (ALS, Airborne Laser Scanning) yhdessä GPS-paikannuksen ja muun tekniikan kehittymisen myötä, oli kehittynyt riittävän toimivaksi ja kustannustehokkaaksi menetelmäksi. (Holopainen, Hyypä & Vastaranta 2013, 11–14.) Metsänmittaus siirtyi nyt vauhdilla 2D-ajasta 3D-aikaan (Maltamo, Packalen, Uuttera, Ärölä & Heikkilä 2008, 304–309).

Koko Suomen kattava ensimmäinen laserkeilauskierros aloitettiin 2010 ja ensimmäinen keilauskierros saatiin päätökseen 2020, jolloin valmistui myös koko maata kattava keilausaineistosta jalostettu metsävaratieto (Kangas ym. 2019, 6). Laserkeilauksella ja monilähdeinventoinnilla tuotetaan niin sanottu hila-tieto, joka on nykyään avointa metsävaratietoa ja jota metsäalan toimijat ja metsänomistajat voivat käyttää maksutta. (Suomen metsäkeskus 2021b.)

Jatkossa kun samasta paikasta tullaan saamaan mitattua 3D-kaukokartoitusaineistoa useampana ajanjaksona, muuttuu geoinformatiikka 4D:ksi (x,y,z,t). Tällöin samaan paikkatietoon on käytettävissä nykytiedon lisäksi myös historiatieto ja sekä ennuste tulevasta. (Holopainen ym. 2015, 7.; Holopainen 2019.)

3.7 VMI kehittyä

VMI mittausverkoston maastotyövaihekiekros on tehty VMI10:stä alkaen (2004) kolmessa vuodessa, jonka jälkeen tulokset valmistuvat neljäntenä vuonna. VMI-kokonaisuus kuuluu nykyisin Luonnonvarakeskuksen (LUKE) toimenkuvaan. Järjestysnumeroltaan VMI12 (maastomittaukset 2014–2018) tulokset julkaistiin vuonna 2019 ja meneillään ovat VMI13 maastomittaukset, joita tehdään vuoteen 2023 saakka. Ensimmäisestä VMI:stä alkaen metsävaratiedon lähde on ollut maastossa tehdyt arviot ja mittaukset. Neljän vuoden välein mitattava systemaattinen koealarypäsverkko (15 000 koealaa) kattaa koko Suomen. Koealassa tehdään mittauksia sekä kuviotasolla, että myös yksittäisille puille, arvioidaan kasvupaikkaa, mitataan puuston tilavuuksia ja kasvuja sekä tuhoja ja määritetään metsähoidollisia tarpeita. (Luke 2010.) Jokaiselta VMI-maastokoealalta tallennetaan yli sata erilaista tunnusta Holopainen ym. 2015, 43).

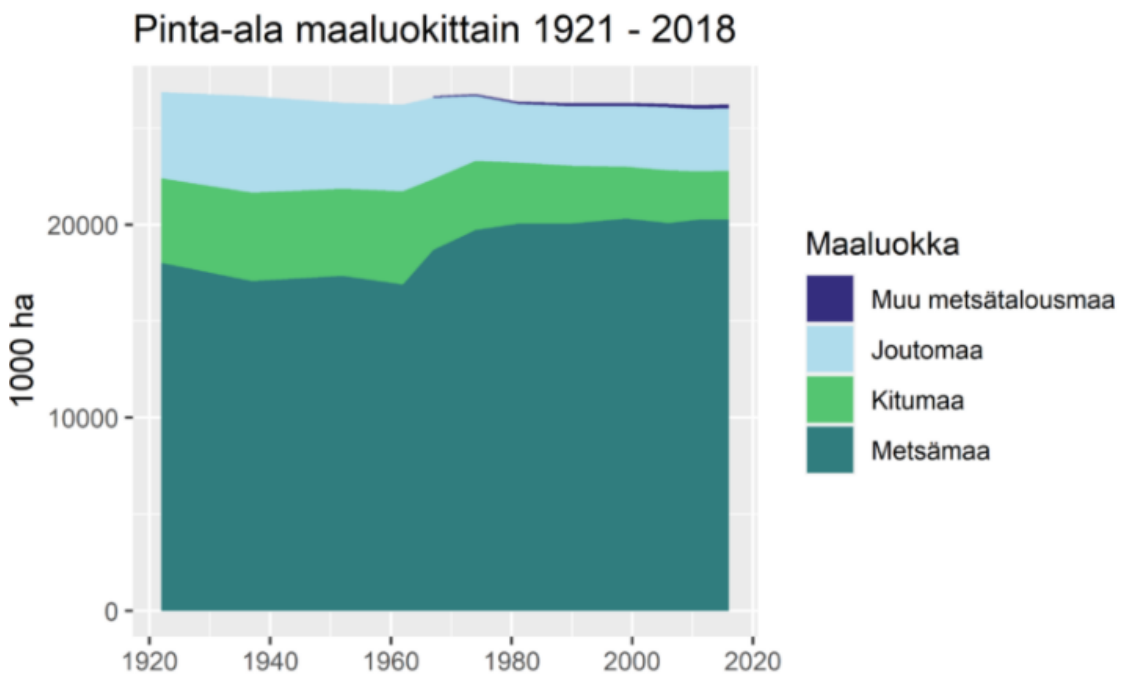
Joka inventointikierrökselle määritellään myös uudistuksia. Jo VMI9:ssä (1996–2003) teemana oli monimuotoisuus. VMI11:lle puolestaan ryppäiden lukumäärää kasvatettiin 25 %, mutta samalla ryppäiden sisältämien koealojen määrää vähennettiin ja mitattujen koealojen yhteismäärä pysyi samana. Hiilivarastojen tarkempien kokonaismäärien selvittämiseksi puustot mitattiin VMI11 alkaen kaikilta maaluokilta (VMI10:een saakka mitattiin vain metsä- ja kitumailta). VMI13 sai puolestaan lisäarvioitaviksi virkistysreitit ja -rakenteet (hirvitornit, nuotiopaikat jne). Tämäkin kuvastaa tulevaisuuden monipuolisempaa metsien käyttöä ja arvostusta sekä tarvetta edelleen kehittää ja monipuolistaa metsien inventointikonaisuuksia. (Luke 2010.)

3.8 VMI tulokset

Valtakunnan metsien inventoinnin tuloksia käytetään nykyään paljon monipuolisemmin, mitä ensimmäisellä inventointikierröksellä 1920-luvulla osattiin onastella. Inventoinnit antavat edelleen datapohjan jalostaa tietoa metsien puuston määrästä ja terveydentilasta kansallisen ja kansainvälisen metsäpolitiikan päätösten perustaksi. Ne tuottavat pohjan suuralueelliselle raportoinnille ja seuraavat

niin maankäytön kuin puustomäärien kehitystä. Uusina inventointitulosten tarpeina ovat tulleet sertifiointien sekä hiilivarastomuutosten ja kasvihuonepäästöjen arviointitarpeet. Myös erilaisten kansainväliset sopimukset, tilastot ja prosessit käyttävät valtakunnan metsien inventointiohjelmien tuottamaa metsävaratietoa moniin eri käyttötarkoituksiin. Tällaisia ovat esimerkiksi ilmastosit sopimukset, metsävarojen ja -pinta-alojen vuotuiset muutokset. (Korhonen & Rätty 2021.)

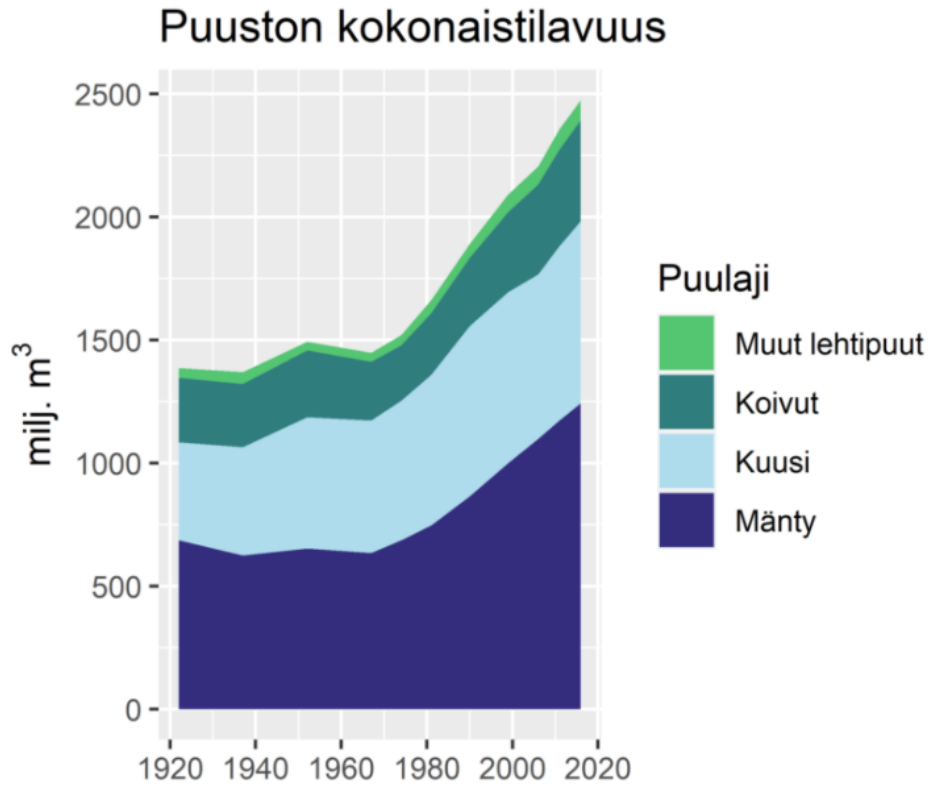
VMI:n tuottamista aikasarjoista voidaan tarkastella esimerkiksi pinta-alan maaluokittaista muuttumista sadan vuoden ajalta (kuvio 1). Metsämaan muutoksissa näkyy selvästi 1960-luvulla alkanut laajamittainen soiden ojittaminen metsämaaksi. (Korhonen ym. 2013, 278–280.)



Kuvio 1. Suomen pinta-ala maaluokittain (Korhonen & Rätty 2021)

Satavuotiaalle metsien inventointihistorialle ja sen tuloksille tuli hieman yllättävääkin käyttöä, koska jouduimme suomalaisina puolustuskannalle EU:n metsänkäyttötavoitteiden kanssa. VMI-historialla pystymme kuitenkin osoittamaan metsänkäyttömme olleen pitkällä aikajänteellä puuntuotannollisesti kestäväällä pohjalla. Suomalaisten mielestä metsien käytön runsauden sijasta tärkeämpää olisi kiinnittää huomiota metsävarallisuuden käytön kestävyYTEEN. Metsiä on käytetty, mutta tilalle on saatettu kasvamaan uusi metsä, jota on pyritty hoitamaan

hyvin. Suomen soisi enemmänkin olla jatkossa kestävän metsänkäytön mallimaa, sillä Suomen metsien puusto on kaksinkertaistunut viimeisen viidenkymmenen vuoden aikana. Kuvioista 2 nähdään miten Suomen puuston määrä on kehittynyt sadan vuoden aikajaksolla. (Korhonen ym. 2013, 296–299.)



Kuvio 2. Puustomäärän kehitys Suomessa. (Korhonen & Rätty 2021)

4 METSÄVARATIETOAINIESTON HANKINNAN KEHITYS

4.1 Maastossa kerättävä aineisto

Satavuotta sitten kaikki metsävara-aineistot mitattiin maastomittauksin jalkatyönä. VMI-aineistoa kerättiin maankattavalta koealaverkostolta ja metsikkö- ja kuviotason suunnittelun metsävaratiedot metsätilatasolla operoiden. Tekniikan kehittyminen ja maastotyön kalleus ovat vähentäneet jalkatyönä tehtävää metsänarviointia, mutta kokonaan siitä ei olla sadassa vuodessa päästy eroon. Tänäkin päivänä yksi merkittävä osatekijä metsävaratiedon tuottamisessa ovat maastossa edelleen ihmistyönä tehtävät referenssikoealamittaukset. Maastokoealoja mitataan Luken toimesta VMI-ohjelman metsäinventoinnin aineistoksi noin 15 000 koealaa vuodessa. Suomen metsäkeskus puolestaan mittaa keilausalueiden referenssiaineistoiksi noin 20 000 koealaa vuodessa. (Kangas ym. 2019, 6.; Kilpiäinen 2021)

Maastossa tehtävien koealamittausten mittalaittekehitys ei ole ollut kaukokartoitusvälineiden kehityksen kaltaista. Mittalaitteiden kehitystä ovat jarruttaneet maastokäytettävyyden ja olosuhdekestävyyden lisäksi suhteellisen vaatimattomat markkinat. Käytössä ovat edelleen pitkälti samat menetelmät, mitä on käytetty jo vuosikymmeniä. Mullistavimpina työtä helpottavina laitteina käyttöön ovat tulleet esimerkiksi ultraäänitoiminen Vertex, jolla sekä ympyräsäteiden, että puun pituuden arviointi on tarkentunut, helpottunut ja nopeutunut sekä elektroniset mittasukset, jolla puiden läpimitat tallentuvat suoraan digitalisesti siirrettävään muotoon. Toki maastotietokoneet, bluetooth-laitteet ja tarkkuus-GPS:t ovat tulleet työtä helpottamaan ja mittaustuloksia tarkentamaan, mutta itse työaikakulua mitattua koealaa kohti ei olla pystytty oleellisesti vähentämään. Jatkossa kuitenkin TLS/MLS monipuolistavat koealoilta saatavaa puustotietoa ja muutamassa vuodessa tämä uusi koeala-aineisto kasvaa uudeksi laajaksi tietolähteeksi tukemaan uusia analysointimenetelmiä. (Arbonaut 2015, 43–44.)

Maastotyönä suoritetaan edelleen metsänmittauksia myös tilakohtaisia metsätaloussuunnitelmia ja metsätila-arvioita laadittaessa. Kuviotason mittaukset maastossa ovat vielä välttämättömiä puustomäärien ja laatujen varmistamiseksi,

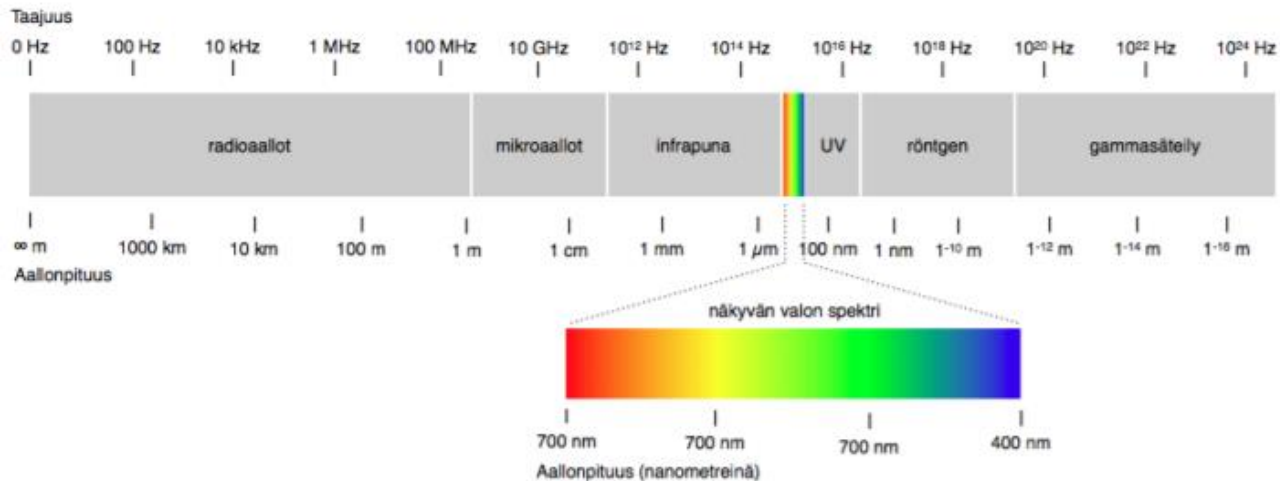
vaikka kaukokartoitusaineisto korvaakin jo osan maastotyöstä tuoden esimerkiksi metsätilan kuvioinnin valmiina. Myös puukauppaa tehdessä tehdään maastossa laatu- ja määrätarkastelut ennen tarjousten jättämistä. (Niemi ym. 2020, 12.)

4.2 Ilmakuvat

Ilmakuvat ovat kehittyneet 1940-luvun filmiaineistoajoista nykyaikaisiksi digitaalikameroiden numeerisiksi tiedostoiksi. Huolimatta tekniikan tuomista uusista, monistavistakin laiteinnovaatioista, fotogrammetrialla (ilmakuvien käyttö kartoitukseen) on edelleen tärkeä rooli metsävaratietojen hankinnassa ja karttojen ja toimenpidekuvioiden laadinnassa. Digitaaliset näkyvän valon ja lähi-infran kuvat luovat pohjan kartta- ja GIS-sovelluksille, sekä tarkentavat puulajierottelua puustotulkinnoissa tänäkin päivänä. (Holopainen ym. 2015, 9–12.)

Jo filmikameroiden aikakaudella metsiä kuvattiin sekä näkyvän valon että lähi-infran aallonpituusalueilla, jolloin puulajitulkinta (havupuu/lehtipuu) sekä kuviointi voitiin tehdä tarkemmin ja nopeammin kuin pelkkien maastomittausten perusteella. Nykyaikaisessa digitaalikamerassa samansisältöinen kuva muodostetaan CCD-ilmaisimatriisilla (Charge Couple Device), jollaista käytetään myös passiivisissa kuvaussatelliiteissa. Numeerisen kuvaustekniikan etuna on mahdollisuus oikaista kuva haluttuun koordinaatistoon, jolloin muodostuneessa ortoilmakuvassa informaatio yhdistyy samalla kartan spatiaaliseen tarkkuuteen. Oikaisu tehdään käyttämällä tunnettuja tukipisteitä, kameran kalibroititietoja sekä numeerista korkeusmallia. Syntyneiden kuvien mittakaava on myös vapaasti muutettavissa käyttötarpeeseen sopivaksi. (Holopainen ym. 2015, 34–35.)

Kaikilla kohteilla on erilaisia ominaisuuksia heijastaa, emittoida ja absorboida säteilyenergiaa kullekin kohteelle ominaisella tavalla. Metsänmittauksessa käytetyt taajuudet ovat näkyvän aallonpituuden (400 nm–700 nm) tai lähi-infran (700 nm–1,4 µm) spektrialueella (Kuvio 3).



Kuvio 3. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Harju 2017)

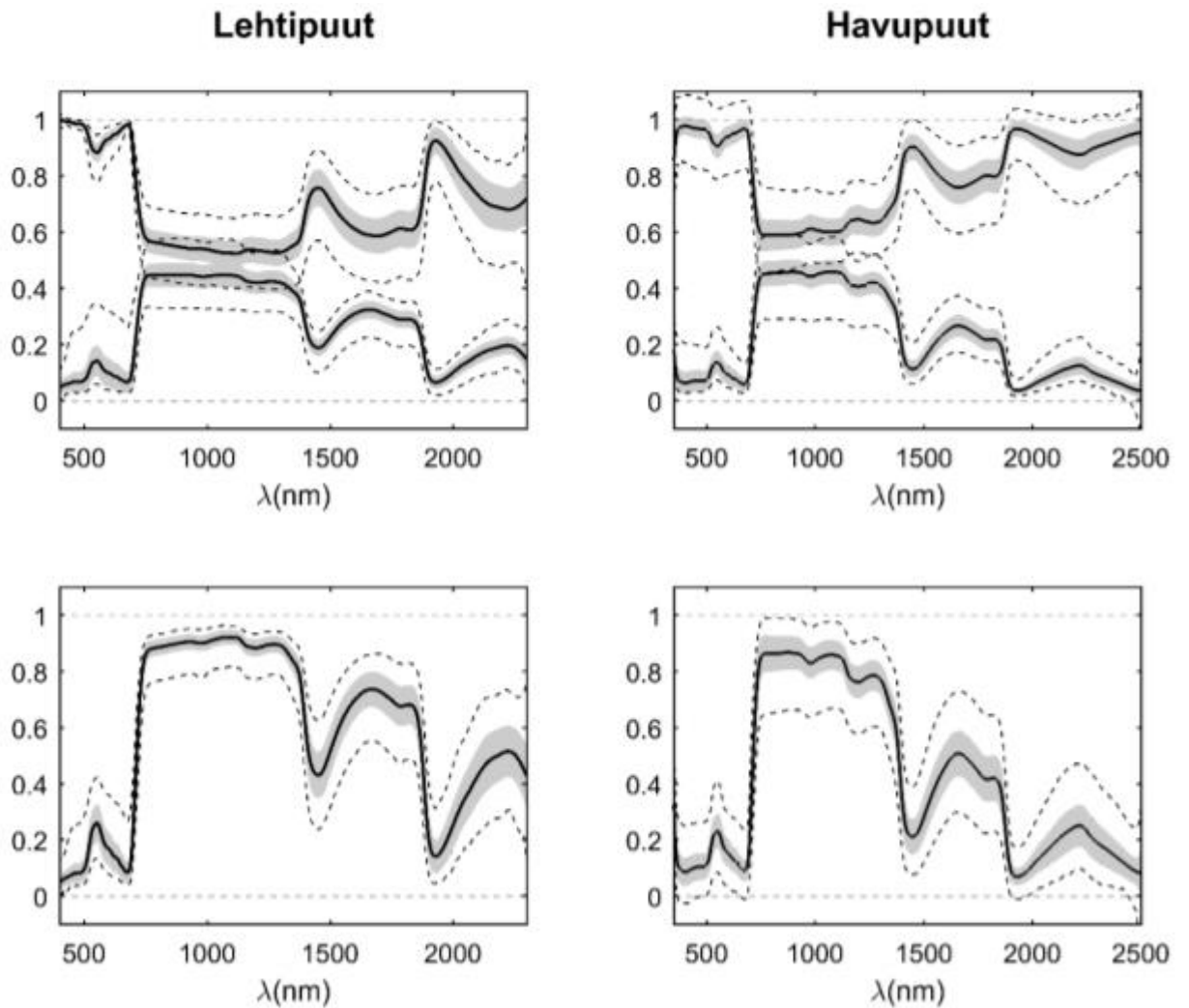
4.2.1 Näkyvän valon kuvat

Tekniikan kehitymisestä huolimatta normaaleilla ilmakuvilla on edelleen paikansa tämän päivän kaukokartoituksen yhtenä lähdemateriaalina. Kameratekniikan parantuminen on mahdollistanut kuvauskorkeuden kasvattamisen ja aineiston tuottamisen kustannusten pienenemisen spatiaalisen tarkkuuden huonontumatta. Nykyisin ilmakekus suoritetaan noin kuuden kilometrin korkeudesta ja aineiston erottelutarkkuus on neljänkymmenen senttimetrin luokkaa. (Laaksonen 2019.; Arbonaut 2015, 41–42.)

4.2.2 Lähi-infra- eli väärävärivärit

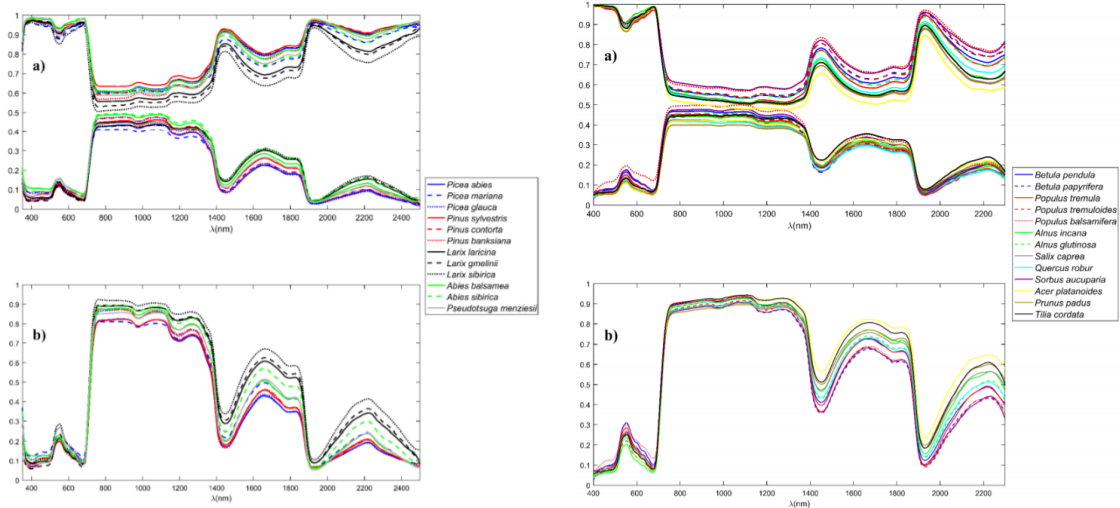
Lähi-infrakuvien käyttö kasvillisuuden tutkimuksessa sai alkunsa niinkin varhain kuin 1910. Tuolloin Robert Wood huomasi kasvillisuuden näkyvän lähi-infrapuvassa eri tavalla korostuneena, kuin muu ympäristö. Vihreiden kasvinosien on tutkittu absorboivan paljon näkyvää valoa ja ultraviolettisäteilyä paljon mutta toisaalta näiden väliin jäävää kapeaa taajuusalueita, lähi-infrapunasäteilyä (700 nm–1,4 μ m), hyvin vähän. Toisin sanoen kasvit heijastavat lähi-infransäteilyä paljon ja tutkimukset ovat osoittaneet lisäksi eri kasvien heijastavan hieman eri tavalla eri spektrin osissa. (Mangold, Shaw & Vollmer 2013, 57–59.)

Uusilla spektrikameroilla voidaan lähi-infra-aluetta tutkia tarkemmin, jolloin puulajeittainen tarkastelu tarkentuu. Kuvio 4 nähdään kuinka havupuiden ja lehtipuiden lähi-infra-alueen heijasteissa on selkeä ero. (Raitio 2017, 29.)



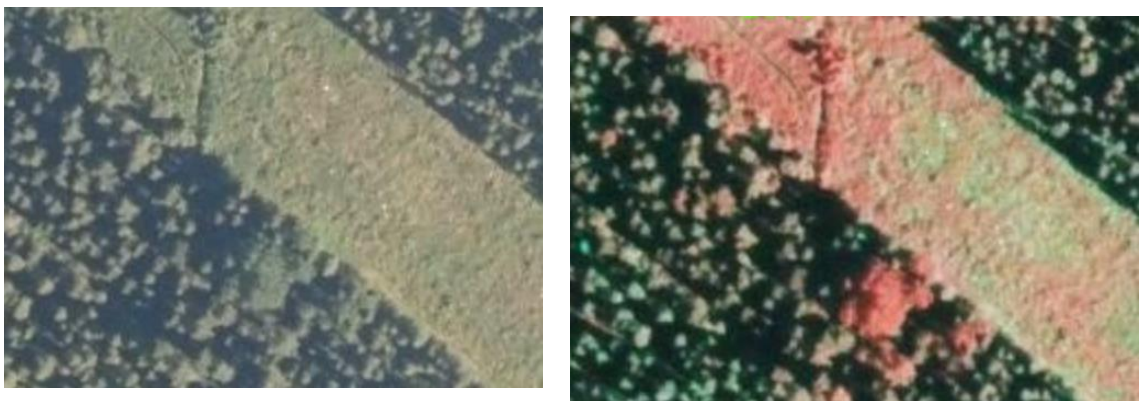
Kuvio 4. Keskiarvospektrit lehti- ja havupuille (Raitio 2017)

Spektriheijasteissa havaitaan myös puulajikohtaisia eroja. Näiden spektrieroista on esitetty esimerkkejä kuviossa 5 (Raitio.2017. 38–39).



Kuvio 5. Eri havupuulajien vasteet vasemmalla ja lehtipuulajien vasteet oikealla (Raitio ym. 2017)

Vääräväriviksikin ristityt lähi-infra-alueen kuvat ovat edelleen tärkeä osa operatiivisen tason metsäsunnittelussa. Lehtipuut ilmenevät kuvissa punertavina, havupuut esiintyvät vihreän eri sävyissä ja paljas maapohja eroaa heinittyneestä. Näin värivärikuvat tuovat näkyvän aallonpituuden kuvien tueksi lisää informaatiota selkeyttämään automaattista metsiköiden kuviointia. (Pukkala 1988, 19.) Kuviossa 6 on vasemmalla normaali ilmakuva ja oikealla värivärikuva. Väärävärikuvasta erottuu selkeästi suuria haapoja sisältävä puuryhmä keskellä alhaalla. Myös läheiselle hakkuuaukolle on kasvanut uudistamistöiden jälkeen lehtipuuvesakkoa, josta voidaan arvioida taimikonhoitotarvetta.



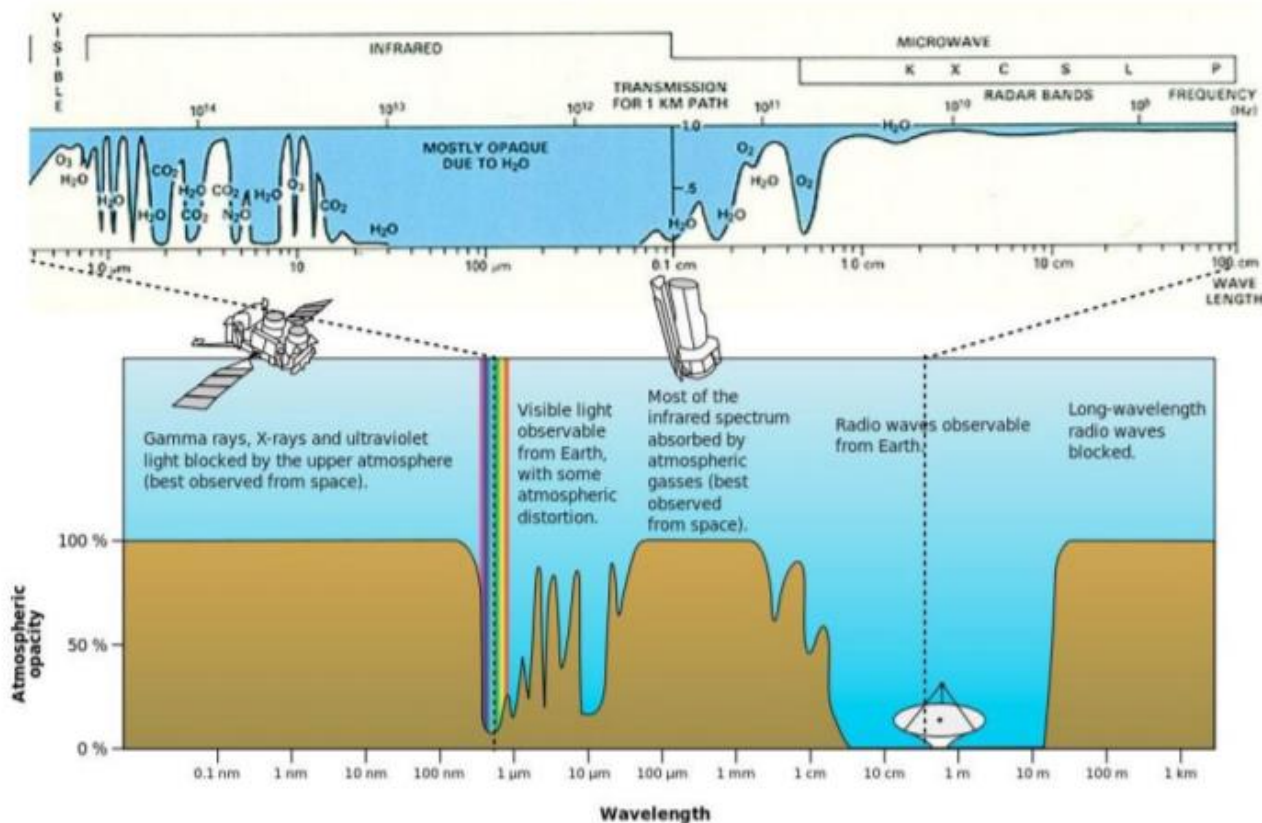
Kuvio 6. Vasemmalla ilmakuva, oikealla värivärikuva (Annala 2021)

Lähi-infrakuvauksessa ilman kosteus ei aiheuta samoissa määrin muutoksia verrattuna näkyvän aallon pituuden kuviin (Rayleigh -sironna), joten väärävärikuvaus on hieman olosuhdevapaampaa. (Mangold ym. 2013, 63.)

Kamerateknisesti väärävärikuvaus ei poikkea juurikkaan tavallisesta kuvauksesta. Jopa samaa laitteistoa voidaan käyttää joko näkyvän valon tai lähi-infran alueen tai molempien kuvaukseen käyttämällä erilaisia suotimia eri aallonpituusalueiden suodatukseseen. (Mangold ym. 2013, 55.)

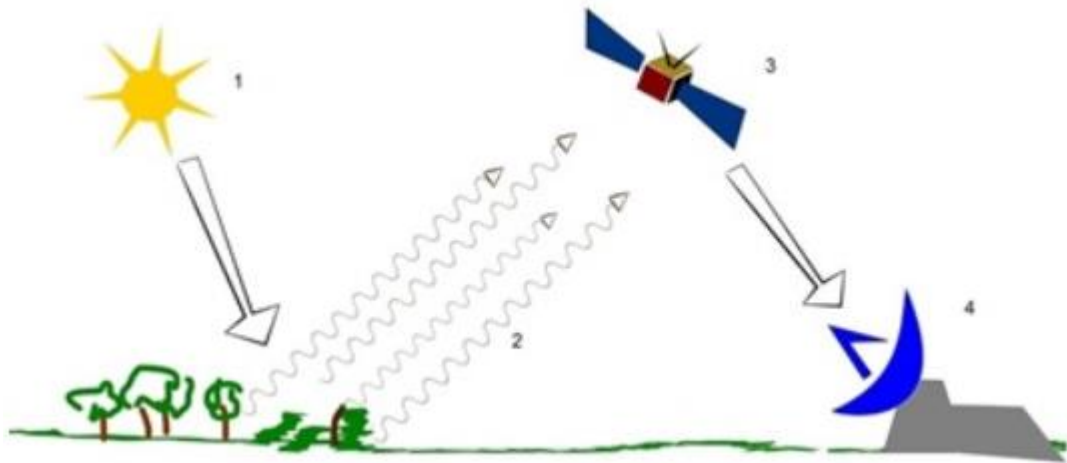
4.3 Satelliittikuva

Satelliitteja on käytetty maapallon kuvaamiseen 1960-luvulta lähtien. Maapallon ilmakehä suojaa meitä avaruuden haitallisilta sähkömagneettisilta aallonpituuksilta suodattaen niitä kokonaan tai osittain, mutta ilmakehä myös läpäisee muutamia eri aallonpituusalueita. Nämä aallonpituusalueet, ikkunat, jotka läpäisevät ilmakehän kokonaan tai vain vähän vaimentuen, käytetään hyväksi satelliittikuvantamisessa ja radiotekniikassa, kuvio 7. (Pukkala 1988, 16.)



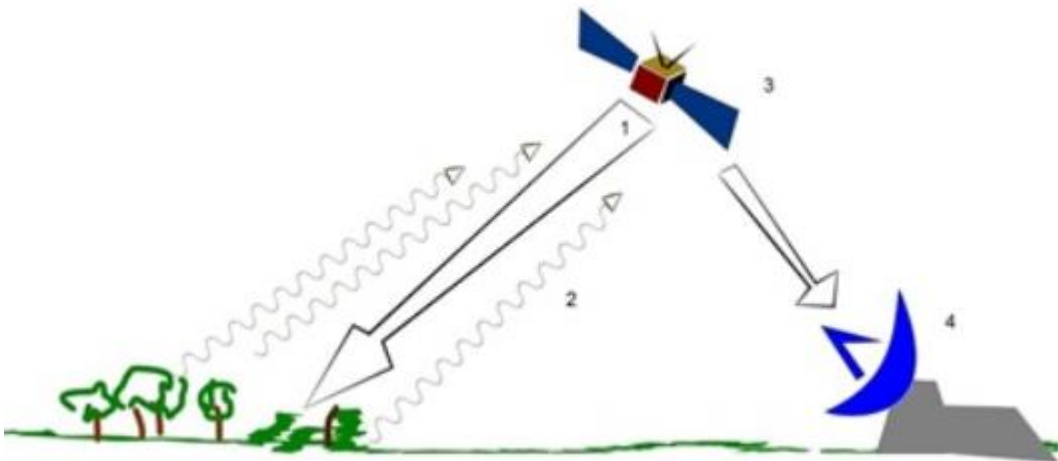
Kuvio 7. Ilmakehän ikkunat (Siegel 2016)

Satelliittikuvantamista on kahdenlaista. Passiivisissa menetelmissä kuvataan eli tallennetaan kuvattavan kohteen heijastamaa, auringosta peräisin olevaa, valota tai lämpösäteilyenergiaa (kuvio 8). Näkyvän valon ja lähi-infra-alueen satelliittikuvaus vaatii oikeanlaiset olosuhteet satelliitin sijainnin sekä valon ja pilvisyyden suhteen, joten uutta aineistoa ei välttämättä saada tuotettua suunnitellusti. (Holopainen ym. 2015, 34.)



Kuvio 8. Passiivinen kuvantamismenetelmä (Kartta.nyt 2021)

Aktiiviset menetelmät puolestaan mittaavat mittalaitteen itsensä lähettämää ja kohteesta takaisinheijastuvaa säteilyenergiaa ja sen muutoksia. Tällaisia ovat esimerkiksi tutkasatelliitit, joiden toimintaa kuvataan kuviossa 9. (Holopainen ym. 2015, 34.)



Kuvio 9. Aktiivinen kuvantamismenetelmä (Kartta.nyt 2021)

Satelliittikuvauksen etuna on kuvien saaminen useasti laajoilta alueilta. Satelliittikuva muodostuu digitaalisen kuvauksen mukaisesti pikseleistä, elementeistä, joiden koko maanpinnalla on vakio. Jokaiselle pikselille mitataan kyseisestä maastonkohdasta heijastuva säteilyarvo, joka voi olla heijastuvaa valoa tai lämpösäteilyä spektrin eri osissa. Kuvien spatiaalinen resoluutio, kuinka pieni kohde maanpinnalta kuvassa erottuu, on parantunut viidessätoista vuodessa huomattavasti. Lisäksi uusi ilmaisintekniikka on tuonut mahdollisuudet tallentaa valon eri aallonpituuksia eri kanaville, spektrinen resoluutio, on tuonut mukanaan kohteen tarkemman ja monipuolisemman havainnoinnin. (Holopainen ym. 2015, 34.; Törmä 2018, 107–116.)

Satelliittikuvauksessa moninaisen muuttujakentän hallitseminen onkin tehtävässä onnistumisen kannalta tärkeää. Kohteen ja ilmakehän ominaisuudet, mitausajankohta ja -geometria vaikuttavat kaikki vastaanotetun sähkömagneettisen säteilyn määrään, eli kyseessä on tällöin radiometrinen resoluutio. Lisäksi on huomioitava mitattavan kohteen ominaisuuden kannalta paras spektrialue sekä luonnollisesti myös paras vuoden- ja vuorokaudenaika. (Tokola, Hyppänen, Miina, Vesa & Anttila 1998, 1–9.; Törmä 2018, 107–116.)

Metsän ja ympäristön kaukokartoitussatelliitteina käytetään yleisimmin karkean resoluution kuvamateriaalia tuottavia NOAA-satelliitteja, keskiresoluution kuvamateriaalia tuottavia Landsat-, SPOT- satelliitteja sekä korkean resoluution kuvamateriaalia kuvaavia IRS- ja IKONOS-satelliitteja. NOAA-satelliittien spatiaalinen resoluutio on 1,1 km ja ne ovat itseasiassa sääsatelliitteja. (Holopainen ym. 2015, 35–36.)

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)			
Band #	NOAA-6,8,10 (μm)	NOAA-7,9,11,12,14,15,16,17,18 (μm)	Spectral Region
1	0.58 - 0.68	0.58 - 0.68	visible red
2	0.725 - 1.10	0.725 - 1.10	near-IR
3	3.55 - 3.93	3.55 - 3.93	thermal-IR
4	10.50 - 11.50	10.3 - 11.3	thermal-IR
5	band 4 repeated	11.5 - 12.5	thermal-IR

Kuvio 10. NOAA-satelliittien kanavat ja mitattavat aallonpituudet (Piwowar 2011)

NOAA:ssa on viisi kanavaa (kuvio 10) ja kuvia saadaan kultakin alueelta neljä kertaa päivässä, kuvauskaistanleveys on noin 2400 kilometriä. (Piwowar 2011) Tämä mahdollistaa nopean ja edullisen tavan tuottaa tilastotietoa ja metsävarakarttoja Euroopan tasolla. NOAA-kuvia käytetään Suomessakin päivittäin esimerkiksi sääennustusten laadinnassa. (Holopainen ym. 2015, 36.)

Landsat-satelliittikuvia käytetään yleisesti metsän ja kasvillisuuden inventointiin. Landsat on amerikkalainen kaukokartoitukseen tarkoitettu satelliitti, jonka keski-resoluution kuvissa erottuvat luotettavasti maankäyttöluokkatason muutokset. Syntyneet avohakkuualueet erottuvat selkeästi, samoin kuin taimikot voidaan vielä erottaa varttuneemmista metsistä. Sen sijaan varttuneiden ja uudistuskyp-sien metsien erot säteilyarvoissa ovat sen verran pieniä, ettei keskiresoluution satelliittikuvilla pystytä riittävän tarkasti ennustamaan kuviotason runkotilavuuk-sia. (Holopainen ym. 2015, 35–36.)

Uusimmat Landsat-kuvat perustuvat monikanavaiseseen keilaukseen, jossa kulle-kin aallonpituusalueelle (kanavalle) on oma ilmaisin. Landsatin (4–5) tärkein inst-strumentti on keilain eli temaattinen kartoitin (Thematic Mapper, TM). Kuvat muo-dostuvat seitsemän kanavan eri spektrialueista. Kanavat (1-5 ja 7) mittaavat nä-kyvän aallonpituuden alueella ja spatiaalinen tarkkuus on 30 metriä. Infrapuna-aallonpituutta mittavan kanavan kuusi spatiaalinen tarkkuus on 120 metriä, mutta se ylinäytteistää datan samaan 30 metrin pikselitarkkuuteen. Landsat (4–5) ku-vanala on 170 km (pohjois-etelä -suunnassa) kertaa 183 km (itä-länsi -suun-nassa). (Holopainen ym. 2015, 34–37.)

Satelliittien spatiaaliset tarkkuudet paranivat ja jo vuosituhannen vaihteessa, vuonna 1999 laukaistu IKONOS-satelliitti oli ensimmäinen kaupallinen satelliitti, jolla päästiin alle metrin spatiaaliseen resoluutioon. Sen tarkkuus pankromaatti-sella kanavalla on 0,8 metriä nadirissa (suoraan satelliitin kohdalta maahan ku-vattaessa). IKONOS:n kanavat tallentavat aallonpituusalueen 0,45–0,9 mikro-metriä kuvanalan ollessa 11 x 11 kilometriä. Vuonna 2001 laukaistiin kiertoradalle amerikkalaisten Quickbird 2 -satelliitti, jonka pankromaattisen kanavan spatiaali-nen erottelukyky on 0,61 metriä ja monikanavaisenakin 2,44 metriä. Euroopan

avaruusjärjestön ESAN uusimmassa Copernikus-satelliittiohjelmassa on 14 Sentinel -satelliittia. Erityisesti metsäinventointeja kiinnostavat vuonna 2015 laukaistun Sentinel 2A -satelliitin ja vuonna 2017 laukaistun Sentinel 2B:n tuottamat monikanavaiset optisen aallonpituuden aineistot, joiden spatiaalinen resoluutio on 10 metriä. (Holopainen ym. 2015, 34–37.; Matikainen ym. 2019, 14–24.)

Korkean resoluution satelliittikuvat ovat jo tarkkuudessaan numeeristen ilmakuvien kilpailijoita. Ainoastaan kuvien korkea hinta on rajoittanut niiden käyttöä ja käytön kehittämistä metsäinventointeihin, mutta kiinnostus globaaleihin ympäristöongelmiin pakottaa osaltaan myös kehittämään satelliittiohjelmiä edelleen. (Holopainen ym. 2015, 36–37.)

2020 -luvulle tultaessa myös nano- ja pikosatelliittien kehitys on ollut nopeaa. Nämä satelliitit ovat kooltaan pieniä (alle kymmenkiloisia) ja niihin saadaan rakennettua korkealta kuvattujen ilmakuvien spatiaalinen resoluutio ja spektrinen kyky. Nano- ja pikosatelliittien käyttö metsien inventoinnissa voisi olla tulevaisuudessa seurannan kehittämisessä, koska satelliitit kykenevät tuottamaan nopearytmistä dataa laajoilta alueilta. (Karten Space 2020.)

Hyperspektrikuvantaminen tuo satelliitteihin lähivuosina täysin uusia ominaisuuksia. Hyperspektrisatelliitteja on laukaistu jo kiertoradoille jo italialaisten (PRISMA, 2019) ja saksalaisten (EnMAP, 2020) toimesta. Myös Euroopan avaruusjärjestö ESA on laukaisemassa vuonna 2022 FLEX -satelliitin. Niiden tuottamien spektritaso-aineistojen pohjalta kaukokartoituksessa mahdollistuu pienten asioiden (puuston kasvu tai terveydentila) muutosten havainnointi suuralueilta nopealla rytmillä. (Holopainen 2019.)

4.4 Tutkasatelliittikuva

Näkyvän valon tai lähi-infran aallonpituuden kuvaaminen on passiivista ja voidaan tehdä vain olosuhteiden salliessa. Tutkasatelliittien oleellinen etu on kuvauksen onnistuminen kaikissa kuvaolosuhteissa eli puhutaan niiden hyvästä temporaalisesta resoluutiosta. Pilvisyys tai pimeys ei rajoita kuvaamista. Tutkien

käyttämä sähkömagneettinen impulssi käyttää mikroaaltoalueen taajuusalueetta (aallonpituus muutamasta senttimetristä metriin), joka läpäisee ilmakehän muuttumattomana (ilmakehän ikkunat). (Holopainen ym. 2015, 37.)

Tutkasatelliitit mittaavat itsensä lähettämää säteilyimpulssia, joka heijastuu takaisin kuvattavasta kohteesta. Yleensä sama antenni toimii sekä lähettimenä että vastaanottajana ja mikroaaltopulssi voidaan suunnata kapeana keilana kuvausalueeseen. Kohteesta takaisin heijastunut säteily tallennetaan ja siitä muodostetaan tietokoneilla kaksiulotteisia tutkakuvia. Näin muodostetut tutkakuvat sisältävät havaitun takaisinsironnan voimakkuuden, havaitun signaalin vaiheen ja etäisyys kohteeseen voidaan laskea tutkimalla lähetetyn ja vastaanotetun signaalin aikaeroa. Takaisinsirontaan vaikuttavat tutkan teknisten ominaisuuksien lisäksi kohteen ominaisuudet. Kuvista saadaan moniulotteisia käyttämällä kuvauksissa erilaisia säteilyn polarisaatioita, mikroaaltokaistoja ja kuvausgeometrioita. (Holopainen ym. 2015, 37.)

Tutkasatelliittien hyvän temporaalisen resoluution lisäksi uusimmilla saadaan myös hyvä spatiaalinen resoluutio (1 - 3 m). Esimerkiksi TerraSAR-X -satelliitilla päästään metrin resoluution ja stereokuvauksen lisäksi määrittämään kahden tutkasignaalin vaihe-eroja (interferometria). (Holopainen ym. 2015, 37.)

Tutkasatelliitit muodostavat jatkossa tärkeän osan metsävaratietojen keruussa varsinkin erilaisissa metsien muutosta seuraavissa hankkeissa. Hyvä resoluutio ja useamman eri ominaisuuden omaavan kanavan samanaikaiset tallennusmahdollisuudet tuovat satelliittikartoituksen laaja-alaisten metsäpinta-alojen seurannan lisäksi myös lähemmäksi operatiivisen suunnittelun tarpeita. Etenkin SAR-tutkien (Synthetic Aperture Radar) odotetaan tuovan mahdollisuuksia operatiiviseen metsävarojen inventointiin, mikäli niiden tarkkuus todetaan riittäväksi koeala- ja kuviotason estimointiin. (Holopainen ym. 2015, 37.; Arbonaut2015, 39–40.; Holopainen ym. 2009, 313–315.)

4.5 Laserkeilaus

Albert Einsteinin loi lasersäteelle teorian (stimuloitu emissio) jo vuonna 1917, mutta ensimmäinen lasersäde saatiin toteutettua vasta vuonna 1960 ja sen kehittäjät (Charles Townes, Nikolai Basov ja Aleksandr Prokhorov) saivat keksinnöstään myös Nobelin palkinnon vuonna 1964. Keksinnöstä sanottiin, että se on ”ratkaisu, joka etsii ongelmaa”. Lausahdus ei ole kaukana totuudesta, sillä lasersädettä on käytetty, sovellettu ja hyödynnetty kuudenkymmenen vuoden aikana mitä moninaisimmin keinoin ja lasersäde on luultavimmin yksi käytetyimmistä ihmisen yksittäisistä keksinnöistä. (Hamilo 2010.)

Ensiaskleet laserilla tehtävään metsänmittauksen suuntaan tehtiin 1970-luvulla, kun NASA:n tutkijat merta tutkiessaan jättivät lentokoneessa laserin ja mittalaitteet päälle ja havaitsivat sen mittaavan puiden profiilejakin maan pinnan ohella yllättävän kuvaavasti. Tutkimuksia laserin käytöstä metsänmittauksessa jatkettiin niin Neuvostoliitossa kuin Pohjois-Amerikassakin 1970- ja 1980-luvuilla ja 1990-luvulle tultaessa mittaustekniikka oli jo sen verran pitkälle kehittynyt, että laserkeilaimella suunniteltiin pystyttävän tuottamaan kolmiulotteinen maaston korkeusmalli. Samaan aikaan kehittyi vapaaseen käyttöön myös GPS-tekniikka, joka oli ollut aluksi vain sotateollisuuden käytössä. Se mahdollisti informaation tallentamisen tarkkaan paikkatietoon, jota laserkeilauksessakin tarvittiin. Metsänmittaus astui täysin uudenlaiseen maailmaan, metsistä kyettiin tallentamaan tarkka kolmiulotteinen malli. (Holopainen ym. 2013, 10.)

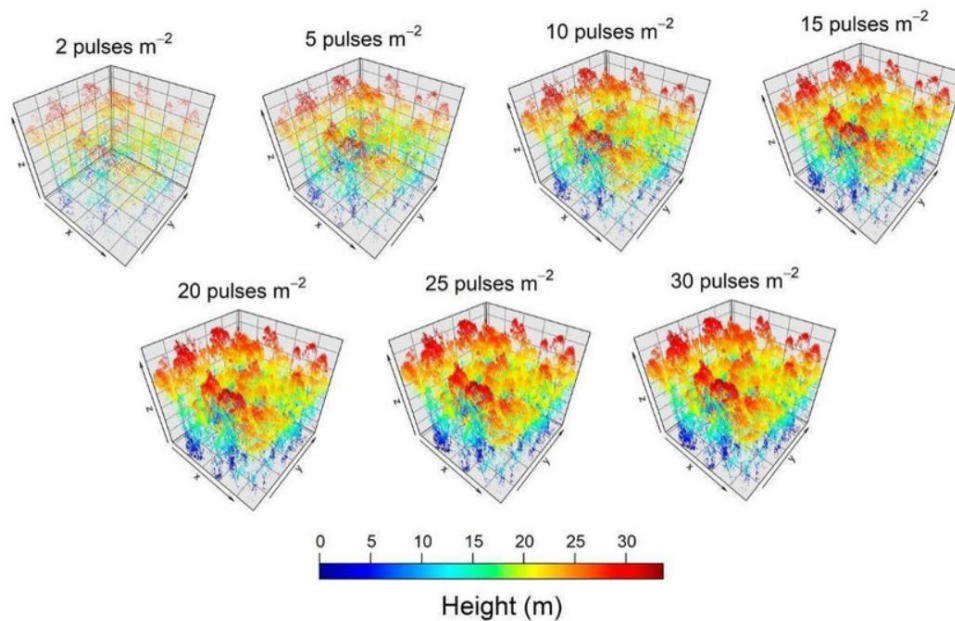
Suomi on ollut metsien laserkeilauksen edelläkävijä. Uutta kolmiulotteista pistepilvidataa voitiin analysoida nopeasti tietokoneiden laskentatehojen kasvaessa ja digitalisaation myötä aineistojen siirto ja käyttö monipuolistuivat. (Maltamo, Packalen, Uuttera, Ärölä & Heikkilä 2008, 309.)

4.5.1 ALS-keilaus

ALS- eli lentolaserkeilausaineisto muodostuu lentoaluksesta kohtisuoraan (tai lähes kohtisuoraan) kuvaten alaspäin, jolloin saatava pistepilviaineisto on x-y -ta-

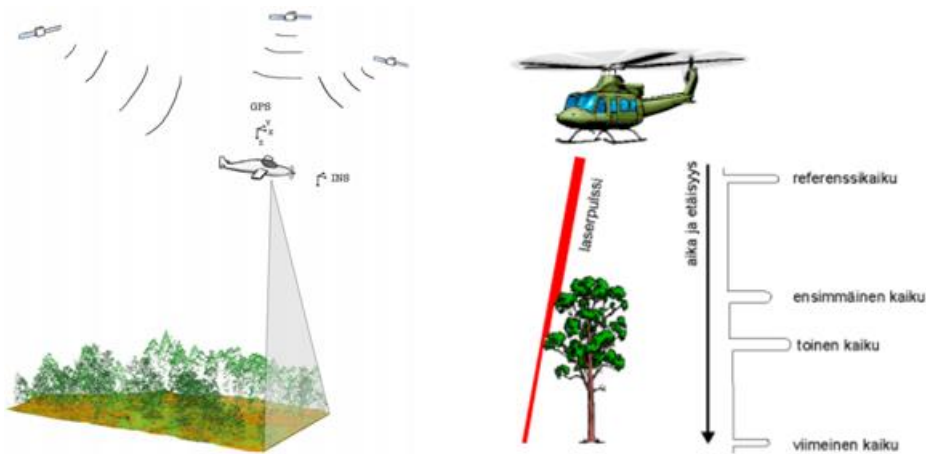
sossa suhteellisen tasaisesti jakautunut maanpinnalle ja aineistosta on suoraviivaista erottaa korkeuskomponentti z :n avulla esimerkiksi maanpinta ja puuston latvuserosten korkeus maan pinnan suhteen. (Holopainen ym. 2013, 17.)

Mitä enemmän pulsseja keilatessa käytetään neliömetrille, sitä tarkempi x,y,z -pistepilvi saadaan kuvattavasta kohteesta muodostettua. Pistetiheyden merkitys saatavan aineiston tarkkuuteen havainnollistuu kuviossa 11. (Holopainen ym. 2013, 17–18.)



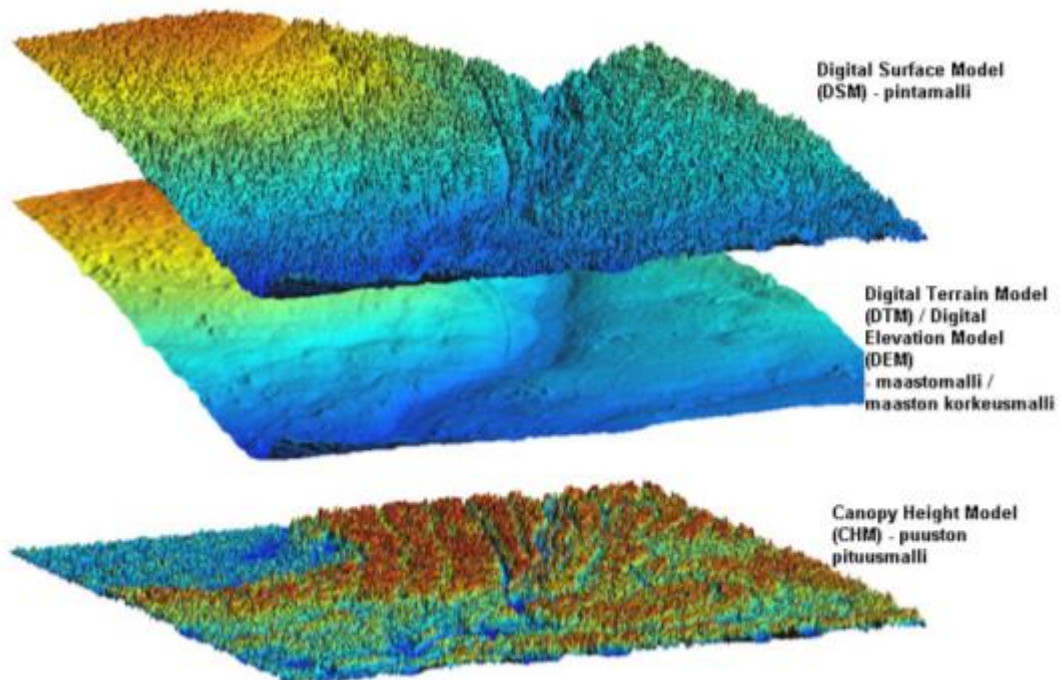
Kuvio 11. Pulssitiheyden merkitys tuotettuun keilausaineistoon (Almeida ym. 2019)

Laserkeilauksen toimintaperiaate on yksinkertainen: lasersäde valaisee kohteen ja ilmaisin rekisteröi kohteesta takaisin heijastuneen säteilyn. Kun lasersäteen lähettävän laitteen paikka ja asento tiedetään (GPS ja IMU -tieto), voidaan valon kulkuajan perusteella laskea kohteen etäisyys keilaimesta ja saada heijastuspisteiden paikka x,y,z -koordinaatistoon. Poikkeuttamalla lasersädettä lentosuuntaan poikittain ja lentokoneen paikan muuttuessa, muodostuu kohdepisteistä kolmiulotteinen pistepilvi. Laserkeilauksen periaate esitetään kuviossa 12. (Holopainen ym. 2015, 37–39.; Kouva 2017, 10.)



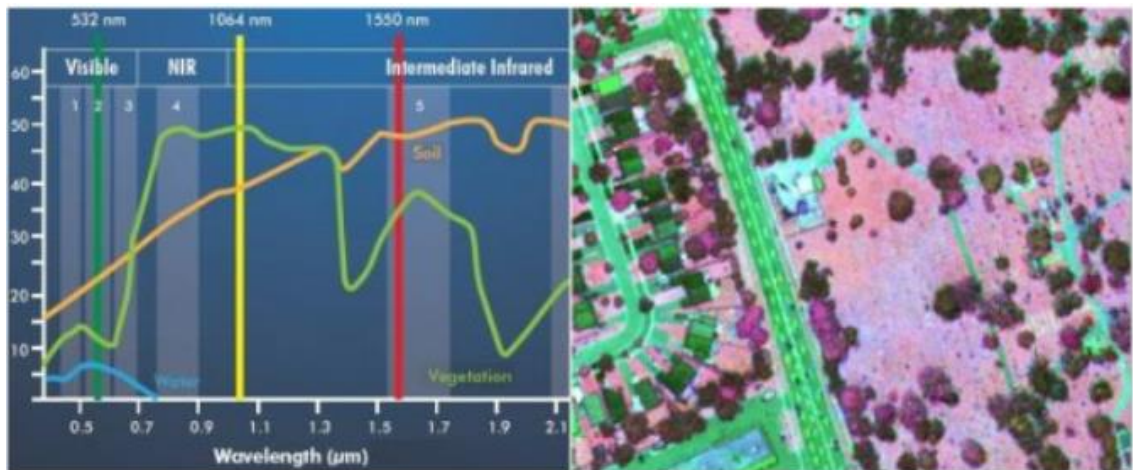
Kuvio 12. ALS-keilauksen periaate (Holopainen ym. 2013)

Keilauksella saatuun kolmiulotteiseen pistedataan on tallentunut pisteitä eri korkeuksilta: korkeimmat kaiut puiden latvoista, välikaikuja oksistosta, aluskasvillisuudesta sekä alimmat kaiut maanpinnasta (kuvio 12) (Holopainen ym. 2013, 18). Vähentämällä keila-aineiston korkeimmista pisteistä (DSM, Digital Surface Model, pintamalli) maanpinnan korkeusmalli (DTM, Digital Terrain Model, maaston korkeusmalli), saadaan tulokseksi puuston pituusmalli (CHM, Canopy Height Model), jota käytetään metsävaratietolaskennoissa. Periaate on kuvattu kuviossa 13. (Holopainen 2015, 83.)



Kuviossa 13. Puuston pituusmallin tuottaminen keilausaineistosta (Holopainen ym. 2013)

Laserkeilaimien kehitys on tuonut mahdollisuuden mitata samalla keilaimella ja keilauskerralla useampia aallonpituusalueita, monikanavakeilauksen. Esimerkiksi vihreän valon ja lähi-infran mukaan ottaen voidaan tuottaa havaintoaineistoa perinteisen ilmakuvan tapaan kasvillisuuden ominaisuuksista, jolloin aineistosta voidaan erotella esimerkiksi puulajit normaalia yksikanavakeilainta paremmin (kuvio 14). Säästöä voi syntyä, kun erillistä ilmakeikasta ei tarvita vaikkei puustollisen laskentatarkkuuden ei juuri odotetakaan paranevan. Aineisto on vielä perinteistä keilausta kalliimpaa tuottaa, koska monikanavakeilaimien keilauskorkeus on oltava matala, jolloin lentotunteja kertyy enemmän. (Kukkonen 2020, 15–16.; Packalen, Kotivuori, Kukkonen, Korhonen, Maltamo, & Heikkilä 2019, 12–18.)

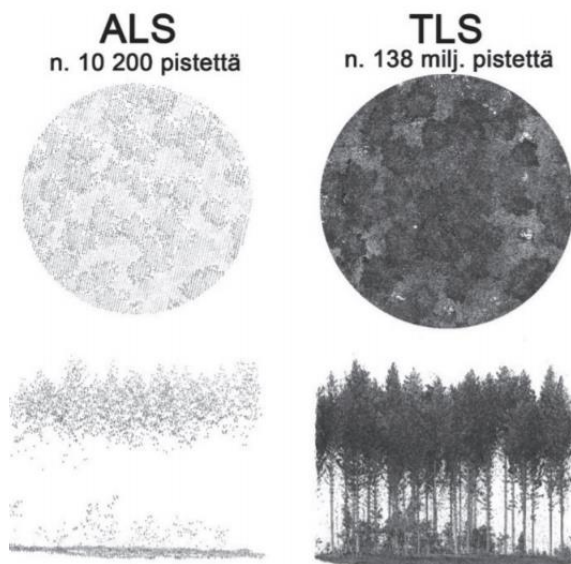


Kuvio 14. Monikanavakeilaimen kanavat ja kuva (Packalen ym. 2019)

Keilaimien edelleen kehittyessä laitteisiin kyetään integroimaan entistä enemmän spektrisiä havaintoja, jolloin myös tulkintatulokset voivat parantua merkittävästi (Hovi & Korpela 2014, 247–252). Lisäksi kun SPAD (Single Photon Avalanche Diode) eli fotonilaskentaan perustuvat monikanavakeilaimet kehittyvät käyttöön, paranee keilauksen tarkkuus entisestään. Fotonilaskentaan perustuvalla keilaimella tarkkuus kolmesta kilometristä on sama kuin monikanavakeilaimella kuudesta sadasta metrillä. (Holopainen 2019.)

4.5.2 TLS/MLS-keilaus

TLS- eli maalaserkeilauksessa pistepilvi tuotetaan sijoittamalla laserkeilain kiinteästi esimerkiksi kolmijalkaan ja keilaussuunta on vaakasuoraan (tai liki vaakasuoraan). Saatava x,y,z -aineisto vaatii prosessoinnilta ja analysoinnilta paljon enemmän, koska pistepilvestä paljon tiheämpi ja sitä myöden vaikeammin tulkittava. Kuvioista 15 nähdään, kuinka paljon enemmän mitattuja 3D-pisteitä keilaus tuottaa maanpinnalta mitaten verrattuna lentokonekeilaukseen. (Holopainen ym. 2015, 48.)



Kuvio 15. ALS/TLS-keilauksen pistetiheys- ja näkymäero (Holopainen ym. 2015)

Paluukaikuja TLS-keilauksessa rekisteröidään kaikesta keilausalan näkyvistä kohteista eli rungoista, oksista, lehdistä jne. Ongelmana on näkymän esteellisyys, eli lähellä oleva iso runko peittää taakseen kaiken, joka puolestaan tekee esimerkiksi koealaympyrän mittaamisen epätarkaksi. Näkyville puille kyetään kuitenkin analysoimaan vähintäänkin yhtä tarkat puustotunnukset (esim. rinnankorkeusläpimitta), kuin perinteisin koealamittausmenetelmin (mittasakset ja Vertex) ja puustosta voidaan muodostaa myös puukartta, jossa jokaiselle puulle saadaan tarkka paikkatieto. Puukarttatietoa voidaan käyttää ALS-aineiston referenssinä. TLS mahdollistaa myös sellaisten puustotunnusten tuottamisen, joiden tuottaminen aiemmin oli mahdotonta kaatamatta puuta. Tällaisia ovat esimerkiksi runko-muoto sekä latvuserroksen ja jopa yksittäisten oksien mittaaminen. TLS-kuvauksen

huonona puolena on pistetiheyden laskeminen mitä kauempana kohde on mitauspisteestä. Tällöin myös epätarkkuus kasvaa etäisyyden myötä. (Arbonaut 2015, 44–46.; Holopainen, Vastaranta & Hyyppä 2014, 229–234.; Holopainen ym. 2015, 48.)

MLS on puolestaan maalaserkeilausta liikkuvalla alustalta (esim. reppukeilain tai mobiilialusta) tai paikkaa vaihtavalla tekniikalla (esim. monitoimikone). MLS tuottaa paremman ja tasaisemman pistejoukon ja sitä myötä paremman näkymän metsästä, mutta kiinteäpaikkaista keilausta hankalamman analysoitavan, kun pisteinformaatioon on monimutkaisempaa saada liitettyä tarkka paikkatieto. Tiheästä pistepilvestä pitäisi algoritmien lisäksi tunnistaa samaan runkoon kuuluvat paluukaiut ja laskea puustotunnuksia mieluummin reaaliaikaisesti, jotta vältetään valtavien datamäärien tallentaminen ja siirto. MLS:n tuottama puukartta on lisäksi epätarkempi kuin TLS:n tuottama. (Holopainen ym. 2015, 48–50.)

TLS ja MLS eivät sovellu suurten metsäalueiden inventointiin, mutta ne tuovat kuitenkin uudet mahdollisuutensa metsänmittauksen eri osa-alueisiin. TLS mahdollistaa esimerkiksi VMI-maastokoealojen ja ympyräkoealan tarkemman analysoinnin ja 3D-mittauksen toistettavuuden ja MLS puolestaan reppukeilaimena tuottaa uuden tavan kerätä pistepilvidataa yksittäistenkuvio- ja metsätilatietojen arviointiin.

4.6 Lennokit ja dronet

Dronet ovat yleistyneet nopeasti ja niiden tekniset ominaisuudet mahdollistavat jo kohtuullisen pitkät operointiajat ja -etäisyydet sekä kuormankantokyvyn, eli drone voidaan varustaa monipuolisesti kameroilla ja/tai laserkeilaimella (kuvio 16). Tyypillinen kuvaus/keilausdrone kantaa helposti viiden kilon kuorman ja operoi yhdellä akulla noin 40 minuuttia. (Hokkanen 2015, 8–9.)



Kuvio 16. Uumo-hankkeessa käytetty spektrikameralla varustettu Drone (Lohilahti, Hannus, Mykkänen & Tuominen 2019)

Dronella voidaan keilata esimerkiksi metsätila ja tuottaa kartoitusaineistoa, josta saadaan analysoitua tarkempaa puuston määrää ja hintatietoa vaikkapa tilan myyntitarkoitukseen tai metsäsuunnitelman tekoa varten. Dronekuvauksella voidaan myös hankkia aineistoa esimerkiksi taimikon hoitotarpeiden tunnistamiseen. (Moilanen 2017, 25–46)

4.7 Puhelinsovellukset

Myös matkapuhelimiin kehitetään metsänmittaussovelluksia. Puhelimien käyttö metsänmittauksessa voikin jossain määrin yleistyä ainakin metsänomistajata-solla. Matkapuhelimista on kehittynyt taskutietokoneita, joissa on muistin ja laskentatehon lisäksi myös kohtainen tarkka (yleensä 3–4 m) GPS-paikannus, valokuvausmahdollisuus ja yhteydet matkapuhelinverkon välityksellä tietojärjestelmiin sekä bluetoothin avulla muihin mittalaitteisiin tai tietokoneisiin. Mobiilisovelluksissa on käytettävissä myös kartta-aineistot, jolloin esimerkiksi oma paikka kohteella saadaan muutaman metrin tarkkuudella tallennettua havainnoitavaan

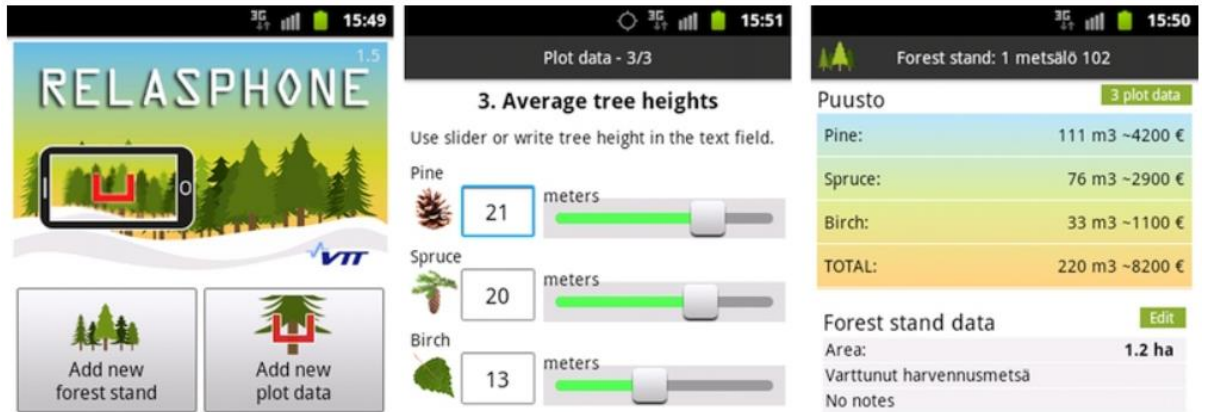
metsäkohteeseen. Esimerkkeinä tällaisista eri tarkoitukseen kehitetyistä sovelluksista mainittakoon Relasphone, Jokamies, Trestima ja Laatumetsä, kukin hie-
man erotarkoitukseen kehitetty mobiilisovellus.

Relasphone on VTT:n kehittämä puhelimen kamerakuvaan integroitu relaskoop-
pihahlo (kuvio 17) Koealalta puhelimeen talletetaan puulajeittain kamerakuvan
hahlon täyttämät puut samalla tavoin laskemalla, miten normaalilla relaskoopilla-
kin tehdään. (Relasphone 2014.)



Kuvio 17. Relasphone-mittaus (Relasphone 2014)

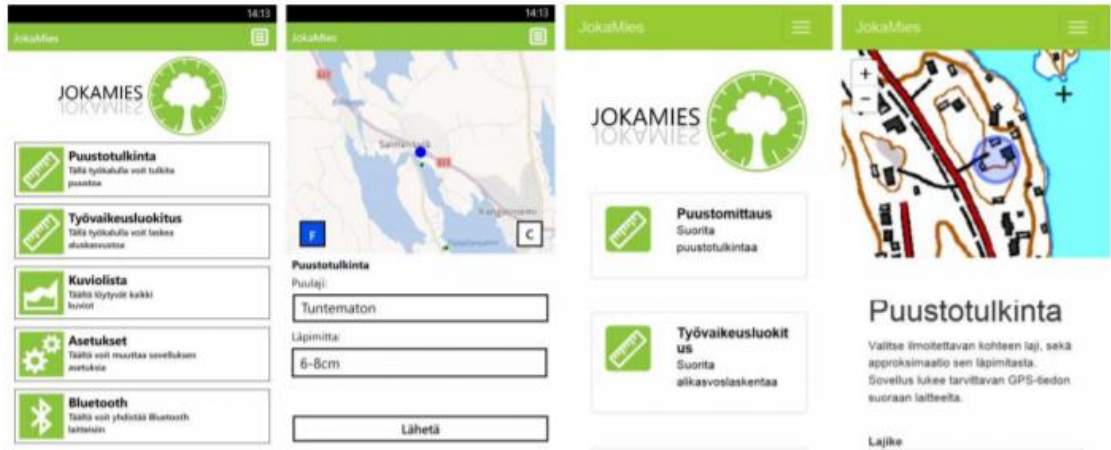
Puille syötetään hahlomittauksen jälkeen keskipituudet ja puutavaralajeille kuu-
tiohintatiedot. Relasphone laskee mitatun koealan perusteella puustomäärät heh-
taarille ja syötetyn kuviopinta-alan jälkeen puhelimennäytölle (kuvio 18) ilmesty-
vät kuvion puustokuutiometrit ja puuston arvo. (Relasphone 2014.)



Kuvio 18. Relasphonen näytöt mittausprosessissa (Relasphone 2014)

Relasphone-sovellusta on testattu oikeissa kenttäolosuhteissa, eikä sovelluksen todettu täyttävän metsäammattilaisten asettamia tarkkuusvaatimuksia. Sovellus itsessään on vakaa ja helppokäyttöinen, mutta käytettävän mobiililaitteen kameran pikselitarkkuus vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen ja myös eri mittajien samasta metsiköstä tehtyjen mittauksen todettiin antavan toisistaan poikkeavia lopputuloksia. Sovellus helppokäyttöisenä ja puhelimessa mukana kulkevana sopii kuitenkin silmämääräisten arvioiden tukemiseen yksittäisissä koemittauksissa. (Moilanen 2015, 40–45.)

JokaMies -sovellus puolestaan on kehitetty hoitotarpeen arvioimiseen nuoremmassa hoitamattomissa metsiköissä. Siinä mitataan ja paikannetaan metsikköön ennalta määrätyt koealat. Alle kuuden senttimetrin läpimittaiset rungot (rinnan- korkeusläpimitta) lasketaan kappaleittain halutulta säteeltä ja syötetään sovellukseen. Luonnollisesti mitä useampia koealoja mitataan, sitä tarkempi lopputulos. Tulokseksi sovellus ilmoittaa (kuvio 19) runkoluvut ja poistuman, joka helpottaa raivaustyön hinnoittelua ja ohjeistusta. Yli kuuden sentin puusto mitataan mittasaksilla ja rinnankorkeusläpimitta syötetään joko naputtelemalla tai elektroniset mittasakset voivat siirtää mittausdatan bluetoothin välityksellä suoraan sovellukseen. (Tiihonen 2014, 17, 32–34.)



Kuvio 19. JokaMies -sovelluksen näyttöjä puhelimessa (Tiihonen 2014)

Trestiman toiminta perustuu kameralla otettuihin kuviin, yhden kuvan vastatessa kamerasta riippuen 60-70 asteen sektoria ympyrästä. Tekniikka on periaatteeltaan sama kuin perinteinen relaskooppiympyrä, mutta Trestiman hahlokerroin on dynaaminen 0,6–1,4 välillä (perinteisessä relaskoopissa kerroin on kiinteä). (Trestima 2018, 3.)

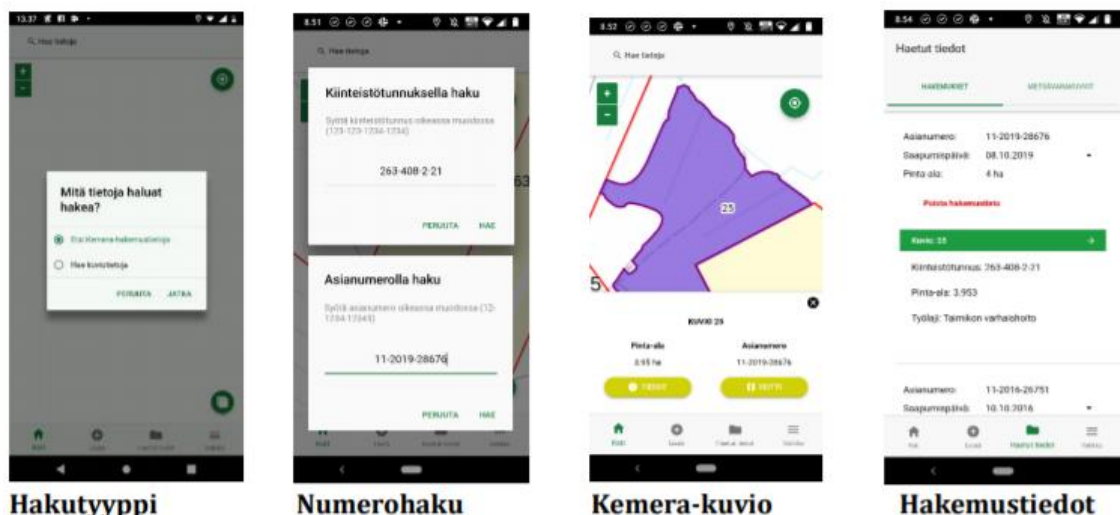
Trestimalla otetut kuvat lähetetään mobiilidataverkon välityksellä laskentapalvelimelle (kuvio 20). Palvelin analysoi kuvien perusteella joko automaattisesti, tai tarvittaessa ihmisen avustuksella, metsäkuvion ja tuottaa puustotiedoista raportin suorana asiakkaanjärjestelmiin vietäväksi. (Trestima 2018, 4–12.)



Kuvio 20. Kuva Trestima-pilvipalvelun analysoimasta kamerakuvasta (Juurinen 2018)

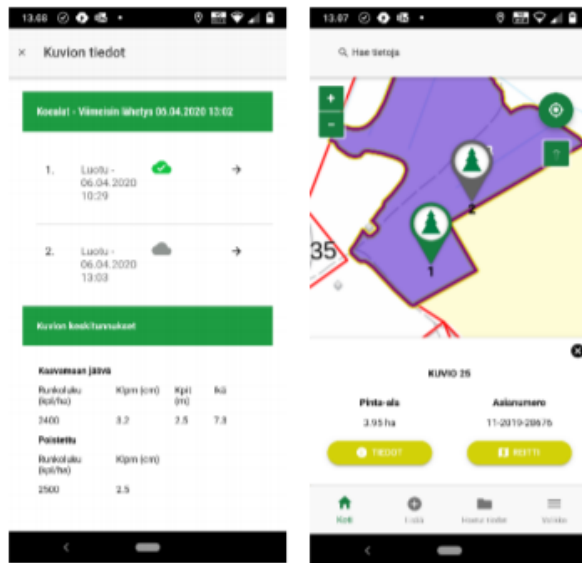
Mittausvirheen ilmoitetaan olevan pienimmillään alle 5 % ja järjestelmä otattaa tarvittaessa lisää kuvia, jotta arviointitarkkuus saadaan riittäväksi (Trestima 2020). Itä-Suomen yliopiston tekemän tutkimuksen mukaan Trestima antaa ensiharvennetussa männikössä puustolle yliarvion, vaikkakin antaa pohjapinta-ala-tarkasteluun riittävän tarkan inventointituloksen. Arvio oli kuitenkin liki sama perinteisen relaskooppiympyräkoealan antaman, joka relaskoopin tapauksessa on tyypillinen alle 17 ppa-metsiköissä. Hehtaarin kuvien analysointiin kuluu noin viisi minuuttia ja järjestelmän tuottama data on metsätietostandardin mukaista, joten se on siirrettävissä muiden toimijoiden tietojärjestelmien välillä. Trestima -sovellus on kehitetty kuitenkin kuvio- ja metsikkötason arvointiin, eikä se sovellu tällaisenaan ympyräkoealojen mittaamiseen. (Juurinen 2018, 11–13.; Arbonaut 2015, 46.; Ikäheimo 2015, 12–17.)

Wuudis Oy:n kehittämä Laatumetsä -mobiilisovellus toimii taimikon ja nuorenmetsänhoidon opas- ja omavalvontailmoituksentekovälineenä. Sovelluksesta löytyvät myös ohjeet koealanmittauksen tekemiseen sekä metsänhoitosuosituksset. Sovellukseen voi ladata kemera-kohteen tiedot (kuvio 21) kiinteistörekisterinumeron tai kemera-hankenumeron perusteella, jolloin sovelluksen kartalle ilmestyvät Kemera-tukea saaneet kuvat kyseiseltä metsätilalta. (Laatumetsä 2018.)



Kuvio 21. Laatumetsä-sovelluksen näyttöjä (Laatumetsä 2018)

Sovellus käyttää puhelimen GPS:ää koealan paikannukseen ja oma paikka näkyy kartalla. Laatumetsä-sovellus tallettaa koealojen paikkatiedot, koealoilta mitatut jäävän puuston kasvutiedot (puulaji, runkoluku, pituus ja ikä), poistumat (poistettujen puiden puulajit ja kannon läpimitat) ja koostaa tiedot kuviokohtaisiksi keskiarvotiedoiksi (kuvio 22). Sovelluksesta voi lähettää omavalvontiedot myös suoraan sähköisesti Metsäkeskukselle. (Laatumetsä 2018.)



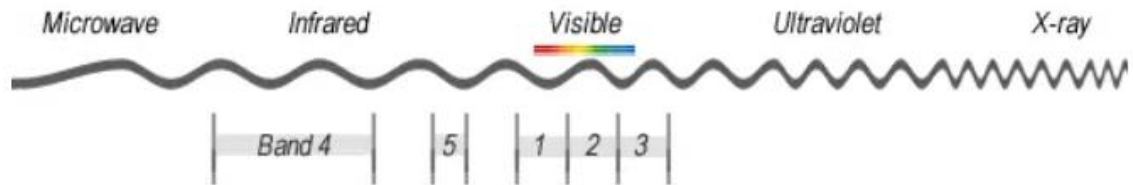
Koealojen yhteenveto Koealat kartalla

Kuvio 22. Laatumetsä-sovelluksen näytöt mh-töiden kontrollimittauksista (Laatumetsä 2018)

4.8 Spektri- ja hyperspektrikamerat

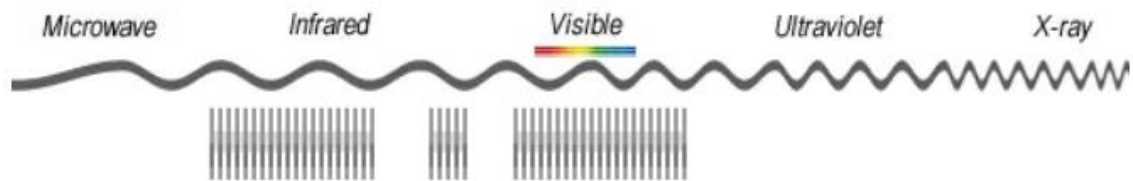
Tekniikan kehitys mahdollistaa yhä pienempien piirteiden tarkemman tutkimisen. Kuvaustekniikassa spektri- ja hyperspektrikamerat kuvaavat hyvin kapeita aallonpituusalueita, mikä mahdollistaa aiempaa tarkemmat analyysit tutkittavasta kohteesta. Tekninen kehitys on hyperspektrikameroissa mennyt ikään kuin tarpeen edellä ja niiden tuomia mahdollisuuksia vasta tutkitaan. Joka tapauksessa ne tuovat ennennäkemättömän tarkkaa havaintoa kuvattavasta kohteesta ja menee hetki, että tutkimus löytää oikeat parametrit eri ilmiöiden ja ominaisuuksien havainnointiin.

Multispektrikameroilla pystytään kuvaamaan suhteellisen leveitä aallonpituusalueita esimerkiksi infrapuna-alueelta ja keräämään data muutaman ilmaisimen keinoin, kanavin, jälkikäsiteltäväksi. Kuva-analysointi on suppeamman ja edullisemmän aineiston pohjalta helpompaa kuin hyperspektrikameroiden kanssa operoitaessa. (Pulkkinen 2020, 12–14.)



Kuvio 23. Multispektrikameran mittauskanavia (Gisgeography 2019)

Multispektrikameran kanavia suhteessa taajuuteen on esitetty kuviossa 23. Hyperspektrikameroiden tallentamasta datasta (kuvio 24) voidaan erottaa satojen, jopa tuhansien kapeiden aallonpituusalueiden datan erikseen, jolloin niistä voidaan analysoida tunnisteita todella tarkasti samalla vähentäen kertyvää ja siirrettävää dataa.



Kuvio 24. Hyperspektrikameran lukuisat mittauskanavat (Gisgeography 2019)

Vuodesta 2000 lähtien hyperspektrilaittein varustettuja satelliitteja on käytetty esimerkiksi kasvillisuuden, maatalouden ja maankäytön, vesivarojen geologian ja saasteiden tutkimukseen. (Gisgeography, 2019)

Vaikkei ominaispiirteen oikeaa aallonpituusaluetta tiedettäisikään, sen löytäminen hyperspektrikuvauksella on todennäköisempää kuin multispektrikuvauksella. Multispektrikuvaus on kuitenkin kokonaisuutena helpompaa, mikäli vain halutut parametrit tiedetään tarkasti.

Suomalaiset tekevät myös hyperspektrikuvantamisessa käytettävien pienien ja nopeiden spektrikameroiden kehityksessä maailmanluokan kehitystyötä. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy on kehittänyt spektrikameroita, joissa yhdistyvät sähköisesti ohjatut Fabry-Perot-interferometrit ja olemassa olevat kamerateknologiat. Näitä spektrikameroita on jo kokeiltu uusissa lennokkipohjaisissa ja käsi-varaisissa spektrikuvantamislustoissa (Viljanen 2017, 5–10.). Tekniikalla pystytään kuvaamaan nopeasti monokromaattisin tai värisuodattimin varustetuilla kamerakennoilla spektrikuutioita. Värisuodattimin varustetuilla voidaan kuvata lisäksi yhdellä valotuksella useita kapeita aallonpituuskaistoja, jolloin kuvantamisnopeutta saadaan nostettua ja aallonpituusaluetta kasvatettua (Junttila 2019, 24–29.)

Aisa-hyperspektrikuva-aineistojen avulla on osoitettu, että spektrisellä erotuskyvyllä on merkitystä puulajeittaisessa tulkinnassa ja tulkintaa onkin pysytty parantamaan merkittävästi pelkästään spektrivalinnoilla. Valitsemalla tietyt kahdeksan aluetta kameraan päästään merkittävästi numeerisia ilmakuvia parempaan puulajitulkintaan. Suomalainen Specim Oy kehittää uutta AsiaFenix hyperspektrisen-soria, jolla saadaan tuotettua uutta aineistoa kuvauslaitteiden ja kuvantamisen parametrisoinnin kehittämiseen. Kehitys mahdollistaa luotettavamman kaukokartoitusperusteisen tiedon keruun. (Viljanen 2017, 6–10.)

Hyperspektrimateriaalin alueellinen kattavuus on edelleen heikko eikä menetelmä vielä ole taloudellisesti kannattava. Jatkossa kuitenkin kameravalmistajien oletetaan tuovan markkinoille 8–10 kanavan sensorin, jossa on säädettävät kanavat. Tämä mahdollistaisi myös laajan alueellisen kattavuuden ja tutkimuskoh-teita onkin jo viritelty esimerkiksi Uumo-hankkeessa, jossa kasvillisuuden terveyden avulla määritetään pohjavesialueita. Hyperspektrikameroita on tutkittu myös kirjanpainajatuho alueen kartoittamisessa. Tutkittava metsäalue on kuvattu dro-neen kiinnitettyllä hyperspektrikameralla ja sopivilla algoritmeilla voitiin aineistosta tunnistaa kaikki kuuset ja valtaosa kuolleiden ja terveiden puiden tunnistamisessa onnistui. (Lohilahti ym. 2019, 142–145.; Pulkkinen 2020, 35–43.)

5 METSÄVARATIEDON ANALYSOINNIN KEHITYS

Kannattavassa investoinnissa saatava hyöty on oltava kustannuksia suurempi. Metsävaratiedon tuottaminen ei tee tässä poikkeusta, vaikka perinteinen kustannus-hyötyanalyysi onkin haastava sijoittaa metsäympäristöön. Metsävaratiedon tuottamisen kustannukset on helppo osoittaa: metsävaratiedon tuottamisen maksaa yhteiskunta eli veronmaksajat. Hyöty jakautuu kuitenkin yhteiskunnalle epäsuorasti esimerkiksi verotulojen tai viennin lisääntymisenä. Myös eri toimijoiden erilaisia hyötyjä on syytä arvioida tapauskohtaisesti, mikä tekee hyötyjen arvioinnista kokonaisuutena haastavaa. (Kangas ym. 2019, 5–7.)

On kuitenkin arvioitu, että laserkeilaamalla tuotetun kaukokartoituksen tuottama metsävaratieto hyödyttää metsänomistajakuntaa pelkästään kokonaistilavuuden luotettavuuden perusteella 210 miljoonaa euroa enemmän kuin satelliittiperusteinen ja 60 miljoonaa euroa enemmän kuin maastoperusteinen metsävaratieto. Laserkeilaustiedon epätasaisuus esimerkiksi puulajisuhteissa vähentää kuitenkin saatavaa hyötyä suhteessa maastoinventointiin. Keilaus kuitenkin tuottaa samansuuruisella yhteiskunnan panostuksella ajantasaisen metsävaratiedon laajemmalle alueelle, joka sekin on laskettava metsänomistajien hyödyksi. (Kangas ym. 2019, 12–13.)

Samaan aikaan kun satelliittikuva-aineistot mahdollistivat suurten alueiden tehokkaan kuvaamisen ja datatuotannon, kehitettiin Suomessa kaksi merkittävää menetelmäkokonaisuutta käyttää eri mittaus- ja kuvausmenetelmien tuottamia aineistoja yhdessä maastossa mitattujen referenssikoealojen kanssa muodostamaan puustotieto koko kuvatulle alueelle. Nykyisin menetelmää sovelletaan sekä VMI-tason, että metsikkötason metsävaratiedon arvioinnissa. Suurin ero on, että laaja-alaisessa inventoinnissa kaukokartoitusaineistot ovat satelliittipohjaisia ja metsätilatasolle jalostuvaa metsävarainventointi pohjautuu lentokoneesta tuotettuun laserkeilaus- ja ilmakehävaikeusaineistoon. (Holopainen 2019, 1–6.)

5.1 Inventointiin sopivien kaukokartoitusmenetelmien yhteenveto

VMI-metsävaratiedon tuottamisessa suurimmat kustannukset muodostuvat koealojen mittauksesta. Kaukokartoitusaineistona on käytetty yleisesti keskiresoluution satelliittikuvia (Landsat TM), jatkossa seurataan myös Sentinel-satelliittien materiaalien soveltuvuutta. Sentinel2 -ainestolle Kaukokartoituksen aineiston resoluutioita ja kustannuksia on vertailtu taulukossa 1. On laskettu, että VMI-tasolla laadukkaalla kaukokartoitusainestolla voidaan tuottaa metsävaratieto kuudesosalla koealoja, joka merkitsisi sadan euron kustannuksella koealakustannuksella laskien puolen miljoonan euron säästöä vuodessa (5000 koealaa). (Arbonaut 2015, 54.)

Taulukko 1. Yhteenveto metsien inventointiin soveltuvista kaukokartoitusmateriaaleista (Holopainen 2015)

Materiaali	Spatiaalinen resoluutio	Spektrinen resoluutio	Temporaalinen resoluutio	Aineiston hinta	R2
Ilmakuvat, lentokorkeus 4000 m*	0,5 m	3 kanavaa, näkyvä valo + lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0,05 - 0.5 €/ha	0,5
Ilmakuvat, lentokorkeus 2000 m*	0,25 m	3 kanavaa, näkyvä valo + lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0,05 - 1 €/ha	0,5
korkean resoluution sat. kuvat	0,5 - 5 m	1 - 3 kanavaa	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	0,1 - 0.5 €/ha	0,4
keskiresoluution sat. kuvat	10 - 50 m	3 - 7 kanavaa, näkyvä valo, lähi-infra, lämpökanava	Kuvaus automaattinen (15-20 päivän välein), pilvisyys ongelma	vanhat ilmaisia, muut alle 0,01 €/ha	0,4
Karkean resoluution sat. kuvat	50 m - 1 km	3 - 7 kanavaa, näkyvä valo, lähi-infra, lämpökanava	kuvaus automaattinen monta kuvaa päivä - 20 päivää), pilvisyys	ilmaisia	0,1
keskiresoluution tutkasat. kuva	20 - 30 m	Mikroaaltojen aallonpituusalue, yksi kanava	Kuvaus tilattava, pilvet ei ongelma, kuvia useita päivässä	0,01 €/ha	0,3
korkean resoluution tutkasat. kuva	1 - 3 m	Mikroaallot, useita polarisaatioita ja kanavia (esim X ja L)	Kuvaus tilattava, pilvet ei ongelma, (5-20 päivää)	0,5 - 1 €/ha	0,3
Spektrometri	1 - 5 m	Satoja kanavia, näkyvä valo, lähi-infra	Kuvaus tilattava, pilvisyys ongelma	10 - 20 €/ha	0,7
Laserkeilaus		Lähi-infra, korkeus + intensiteetti, tulevaisuudessa useampikanavaista	Kuvaus tilattava, riippumaton auringon valaisuolosuhteista	0,3 - 3 €/ha (pelkkä ALS-data)	0,8

*lentokorkeus voi olla 0,5 m resoluutiolla maksimissaan noin 7000 m ja 0,25 m resoluutiolla noin 4000 m.

Myös aluepohjaisessa laserkeilausinventoinnissa on tutkittu koealojen tarpeen määrää ja huomattu suurehkoja alueellisia eroja. Tilastollisen analyysin perusteella koealojen määrää voitaisiin vähentää huomattavasti Pohjois-Pohjanmaalla ja Kainuussa, mutta toisaalta koealojen määrää voisi lisätä Häme-Uusimaalla. (Arbonaut 2015, 54.)

5.2 VMI-koealadatata valtakunnan puustotieto ja VMI-rasterikartta

VMI-koealat tuottavat valtakunnan tason metsävaratiedon laskennan pohjatiedon. Erilaisilla simulointityökaluilla VMI-koealadatata tuotetaan strategisen metsäsuunnittelun tueksi metsien alueellisia tuotanto- ja käyttömahdollisuusarvioita sekä metsien käytön suunnittelun. Tällainen simulointityökalu on esimerkiksi MELA, joka kehitettiin käyttötarkoitukseen jo 1970-luvulla ja jota on vuosikymmenten kuluessa kehitetty ja monipuolistettu. MELA-laskenta tuottaa VMI-koeala-aineistosta valtakunnallisia tai alueellisia vaihtoehtolaskelmia ja vaikutusarvioita (<http://mela2.metla.fi/mela/index.html>). VMI:n tuottamasta datasta luodaankin nykyisin suuralueiden (kunta-, maakunta- ja valtakuntatason) metsävaratiedoista yli 40 erilaista teemoitusta. Sadan vuoden inventointihistoriasta voidaan jalostaa myös pitkän ajan puuston tilavuuden ja metsien käytön kehittymistä (kuvio 25). (Arbonaut 2015, 8.)



Kuvio 25. Puuston kasvun ja poistuman kehitys 100 vuodessa. (Luke 2021)

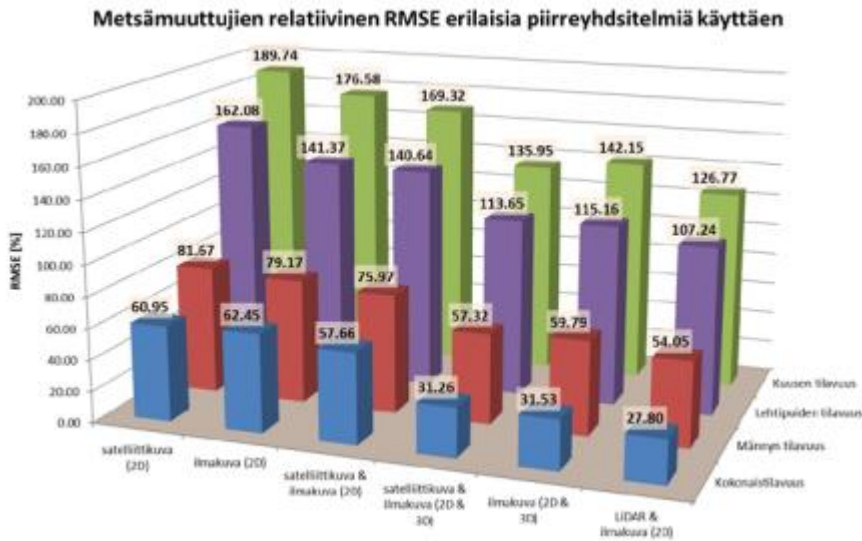
VMI-puustorasteri muodostetaan ei-parametrisen k:n lähimmän naapurin menetelmällä. Maastossa mitattujen koealojen piirrearvoja verrataan saman paikan satelliittikuvan pikselien piirrearvoihin, jolloin kyseiselle pikselille saadaan tarkka puustotieto. Jokaiseen satelliittikuvan pikseliin puolestaan yleistetään haluttu määrä lähimpien piirrearvojen omaavien koealojen maastossa mitattuja metsävaratietoja. Pikseliin kohdistuvien koealojen määrää ja painotusta voidaan lisäksi muuttaa halutuksi, jolloin keskiresoluution Landsat TM -satelliitin pikseleihin saadaan tarkempi metsävaratieto, kuin vain pelkästään maastomittausten koealotantoja yleistämällä. (Holopainen ym. 2015, 41–45.)

Monilähdeinventoinnissa (MVMI) yhtenä apuaineistona käytetään ilmakuvien ja vääräväriskuvien sävyarvoja, joka mahdollistaa tarkemman puulajitiedon. Kuva-nalkioiden koko maastossa on 20 x 20 metriä. Näillä kahdella menetelmäkoko-naisuudella saadaan muodostettua tarkempi ja kustannustehokkaampi metsäva-ratieto laajoille alueille kuin vain yhtä aineistotietolähdettä analysoiden. Kehite-tyssä monilähdeinventointimenetelmässä tarkkaan paikkatietoon ja pikseliin saa-daan liitettyä kerralla kaikki MVMI:ssä käytetyt yli sata puusto- ja kasvupaikka-tunnusta, joista muodostetaan VMI-rasteridata. (Arbonaut 2015, 8, 40–41.)

Tilastollisella menetelmällä yhdistäen keskiresoluution satelliittikuvat, maastossa mitatut koealat tarkan paikkatiedon kera ja tuomalla analyysiin mukaan ilmaku-vien tulkinta-aineisto, saadaan tuotettua VMI-tason metsävaratietoihin satelliitti-aineiston pikselitasolle riittävä tarkkuus suuraluetulkintaan (yli 100 ha alueille). Kuviotasolle vietäessä näiden aineistojen keskivirhe on kuitenkin 45–55 %, joka on metsikkötason suunnitteluun liian suuri. On myös tutkittu VMI:n ja laserkei-laustiedon yhdistämistä. Vaikka laserkeilaus antaa tarkemman arvion keskitila-vuudelle antaa MVMI parempia tuloksia metsämaan osuuksien ja sitä kautta myös kokonaistilavuuden suhteen. (Holopainen ym. 2015, 43.; Kangas ym. 2020, 11.)

5.3 Laserkeilausaineistosta kuviotason metsävaratieto

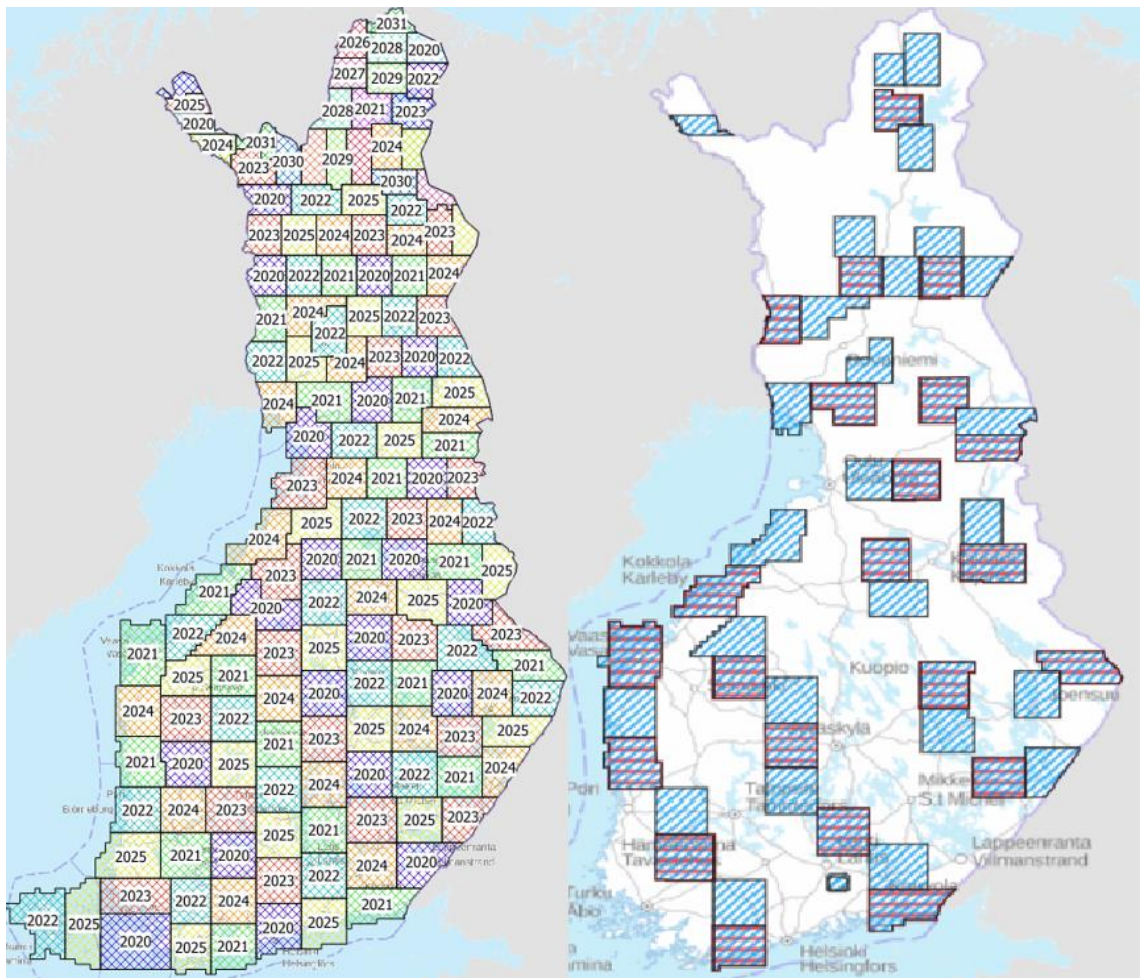
Tuotetun metsävaratiedon tarkkuus riippuu käytetystä kaukokartoitusaineistosta ja voi tuottaa puuston tilavuusarvioihin suuret virheet (kuvio 26). Puuston kokonaistilavuuteen liittyviä virheitä voidaan pienentää käyttämällä 3D-kaukokartoitusaineistoja. (Kangas ym. 2020, 4–6.)



Kuvio 26. Puuston tilavuusvirheet hilatasolla kaukokartoitusaineistoittain ja puulajeittain. (Kangas ym. 2020)

Aluksi 1990-luvulta kehitettyä monilähdeinventointia käytettiin numeerisiksi muutuneiden kuva-aineistojen ja maastokoealojen kanssa. 2000-luvun ensimmäinen vuosikymmen toi uutena mahdollisuutena laserkeilauksen ja metsän 3D-aineiston. Samalla puuston inventointiyksiköksi muodostui hilaruutu ja Suomi jaettiin 16 x 16 metrin ruutuhin, joille k-NN -menetelmällä yleistettiin referenssikoealoilta mitattu puustotieto. Metsätilatason kuviot saavat puolestaan puustotiedot niille osuvien hilaruututietojen pohjalta. Keilausaineisto monipuolisti myös samalta keilauskerralta saatavan aineiston käytön eri tarkoituksiin ja nykyään keilaustiedon hankinta tehdään yhteishankintana. Aineistoa käyttävät eri organisaatiot omiin tarpeisiin ja lopputuotejalostuksiinsa. Maanmittauslaitos tuottaa ja ylläpitää keilausaineistosta maan pinnan korkeusmalleja, Suomen Metsäkeskus analysoi datasta metsävaratietoa. Keilaustietoa käytetään myös maatalouden viljelypinta-alojen laskentoihin. (Arbonaut 2015, 12–16, 41–42.)

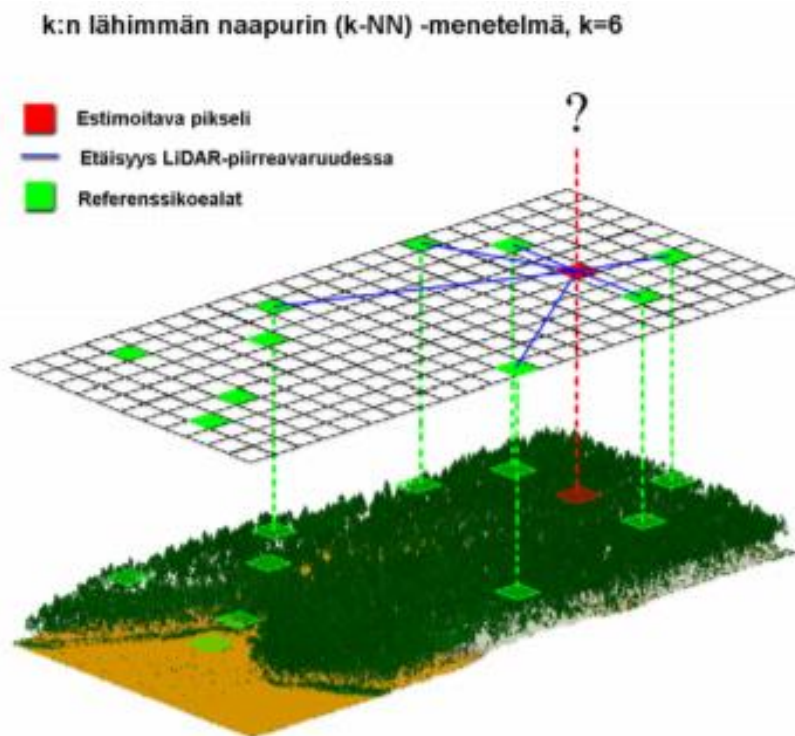
Vuodesta 2020 alkaen Suomen kuvaus- ja keilauskierto lyhennettiin ensimmäisen kierron kymmenestä vuodesta kuuteen vuoteen laserkeilauksella ja keilauksen välissä tehdään vielä täydentävä ilmakuvaus kolmen vuoden jälkeen. Tällöin ilmakuvat uusiutuvat kolmen vuoden ja laseraineisto kuuden vuoden syklissä. Ilmakuvaus suoritetaan noin seitsemän kilometrin korkeudesta ja pienin kohde, jonka kuvasta erottaa on 40 senttimetriä. Laserkeilaus suoritetaan nykyään noin kahden kilometrin korkeudesta ja vuodesta 2020 lähtien aineisto tuotetaan tiheäpulsssiaineistona (5p/m²). Kesän 2021 keilaus- ja kuvausalueet on esitetty kuviossa 27. (Heikkilä 2021.)



Kuvio 27. Suomen keilausalueet vasemmalla ja 2021 aikana keilattavat ja kuvatavat alueet oikealla (Heikkilä 2021)

5.3.1 Aluepohjainen tulkinta harvapulssiselle ALS-aineistoille

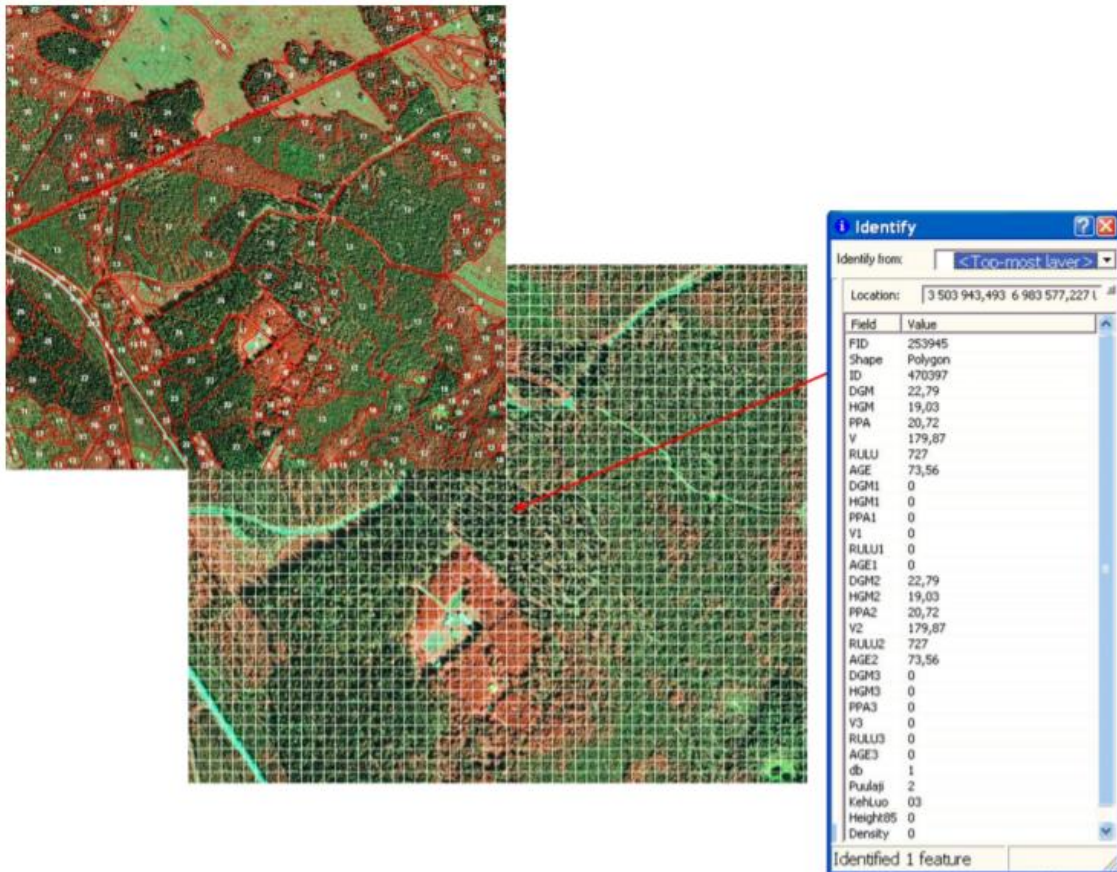
Vuosina 2010-2019 keilausaineisto tuotettiin ns. harvapulssikeilauksella. Käytetty pistetiheys maanpinnalla on tällöin 0,5 pistettä neliömetrillä. Harvapulssiin lentolaserkeilauksen aineiston tulkintaan on käytetty normaaleja tilastotieteellisen mallintamisen periaatteita. Aineisto jaetaan otosyksiköihin, hilaruutuihin, joista lasketaan kaukokartoituspiirteitä, joista johdetaan tarpeen mukaisia puusto- ja metsikkötunnuksia. Tätä varten maastosta on oltava mitattuna riittävä määrä koealoja, joiden vastaavia piirteitä verrataan lähialueiden muihin otospisteisiin ja näin saadaan kaikille laskettua kaikille ruuduille metsikkötunnuksia. Menetelmä on sama, mitä on käytetty satelliittikuvauksessakin 1990-luvulta alkaen, k-nn ja monilähdeinventointi. K-nn -menetelmän koealojen puustotietojen yleistystä on kuvattu kuviossa 28. (Holopainen ym. 2013, 21–22.; Rätty, Packalen & Maltamo 2019a, 1–7.)



Kuvio 28. K-NN -menetelmän periaate (Holopainen ym. 2013)

K-nn -menetelmässä laserkeilausdata jaetaan maaston samankokoisiin 16 x 16 metrin hilaruutuihin. Ilmakuva-aineiston sävyeroja ja tekstuureja tulkiten tunniste-

taan puulajit. Maastossa samalta keilausalueelta on mitattu riittävän useita koealoja, joihin yhdistyvät mitatut puustotiedot ja samasta paikasta keilauksen ja ilmakuvatulkinnan antamat piirteet. Puustotiedot voidaan tämän jälkeen yleistää muihin hilaruutuihin (kuvio 29) sopivia painotuksia käyttäen ja edelleen laskea myös kuviotasolle keskimääräinen puustotieto. (Räty, Packalen & Maltamo 2018, 2–16.; Holopainen ym. 2013, 21–26.; Räty, Packalen & Maltamo 2019b, 2–16.)



Kuvio 29. Hila-aineiston puustotieto (Arbonaut 2015)

Oleellista k-nn -monilähdeinventointia käytettäessä on mitata riittävästi maastokoealoja jokaiseen keilatun metsäalueen ositteeseen, jotta referenssiaineistoa on käytössä tarvittava määrä (Kilpiäinen 2021). Esimerkiksi kesällä 2020 keilatun 160 000 hehtaarin tiheäpulsstikeilauskoealan inventointiin mitattiin kaikkiaan 850 maastokoealaa, joita käytettiin koko keilausalan puustotietojen estimointiin aluepohjaisella tulkinnalla. Koealojen lisääminen tarkoittaa aina lopputulosta, mutta nostaa samalla metsävaratiedon hintaa. On kuitenkin laskettu, että 200 000 hehtaarin keilausalan maastokoealojen nosto 500 mitatusta koealasta yhdellä kas-

vattaa saatua hyötyä yli 3000 euroa. Edelleenkin on laskettu, että yhden prosenttiyksikön parannus puuston kokonaistilavuuden RMSE:ssä (keskineliövirheen neliöjuuri), kasvattaa metsänomistajan tuloja 4 €/ha. (Kangas ym. 2019, 21.)

Tyypillisesti kuviotason virheissä päästään tilavuuden ja pohjapinta-alan osalta 12 %, läpimitta ($d_{1,3}$) 10 %, pituus 6 % tasolle (Holopainen ym. 2015, 129). Suurimmat haasteet menetelmässä on puuston iän tulkinnessa. Se voidaan toisaalta liittää osaksi ei-parametrissa mallia, mutta tällöin ikämittaukset on tehtävä maastoreferenssikoealoilta. Tunnuksia voidaan johtaa myös vanhoista inventointitiedoista. Tällaisia tunnuksia voisivat olla ikä, luontokohteet sekä kuvion maapohjaa kuvaavat tunnuksset. (Arbonaut 2015, 34–35.)

Aluepohjaiseen menetelmään perustuen tutkitaan myös täyden aaltomuodon (full wave form) laseraineiston käyttöä metsävarainventoinnissa. Menetelmällä on saatu laskettua hieman tarkempia metsävaratietoja kuin pistemuotoisella (discrete return) keilausmateriaalilla. (Arbonaut 2015, 37.)

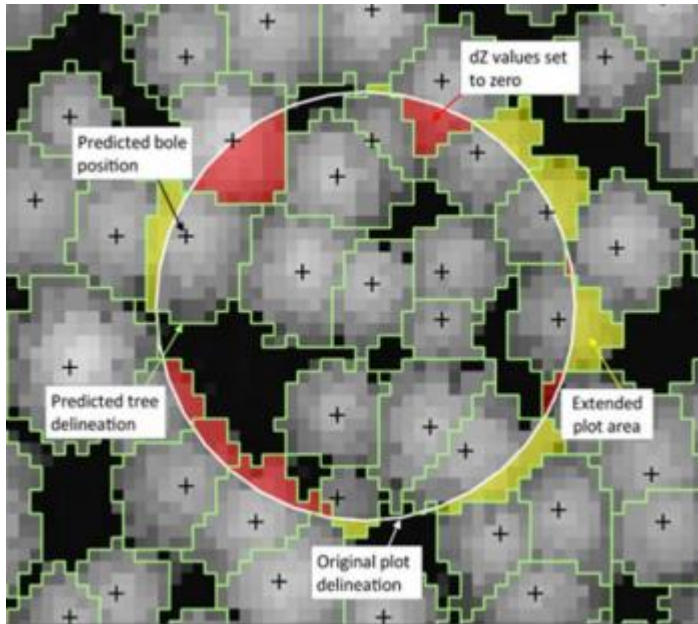
5.3.2 Yksinpuintulkinta tiheäpulssiselle ALS-aineistoille

Vuodesta 2020 lähtien Suomessa siirryttiin keilaamaan tiheäpulssikeilaimilla. Keilaus tuottaa maan pinnalle kymmenen kertaa enemmän pisteitä (viisi pistettä neliömetrille) kuin aiemmin käytössä ollut harvapulssikeilaus (puoli pistettä neliömetrille). Käytettäessä tiheämpää pulssitiheyttä, tuotetaan aineisto, johon voidaan soveltaa yksinpuinmenetelmää (ITD). Siinä pyritään estimoimaan tai mittaamaan puustotunnukset puiden pituuden, latvusten koon ja puulajien perusteella. Ongelmana tiheäpulssiaineistossakin on suurten latvusten alle näkymättömiin jäävät pienemmät puut, jolloin puustolaskennan virheet kasvavat. (Holopainen, Hyyppä, Vastaranta & Hyyppä 2013, 133–134.; Holopainen ym. 2013, 38–40.; Packalen, Maltamo, Rätty, Kukkonen, Kotivuori & Korhonen 2019, 27–33.; Rätty 2020a, 38–40)

Puittainen tulkinta parantaa sekä puutavaralajien estimaatteja ja pääpuulajien lajeittaisia ennusteita, mutta antaa myös tarkemmat arviot vähemmistönä esiintyvälle puulajeille. Yksinpuintulkinnalla on myös pyritty valtapuiden tulkin avulla

kalibroimaan ja parantamaan aluepohjaista tulkintaa. (Räty, Packalen, Kotivuori & Maltamo 2019, 113–114). Verrattaessa puolestaan perinteistä yksikanavakeilausaineiston ja ilmakuvatulkinnan yhdistelmää pelkkään monikanavakeilauksen tuottaman data-aineistoon, todettiin perinteisen menetelmän tuottavan tarkempaa metsävaratietoa. Mutta kahdenaikaisen lentolaserkeilausaineiston (lehdelliseen ja lehdettömään aikaan) todettiin antavan lähes yhtätarkan tukkitilavuusenusteen kuin perinteinen menetelmä. Lentolaserkeilausaineistoa voidaan käyttää apuna valittaessa optimaalista analysointitapaa läpimittajakaumaennusteiden tuottamiseen. (Räty, Packalen, Kotivuori & Maltamo 2019, 114–125.; Packalen ym. 2019, 27–33.; Räty 2020b, 27–32)

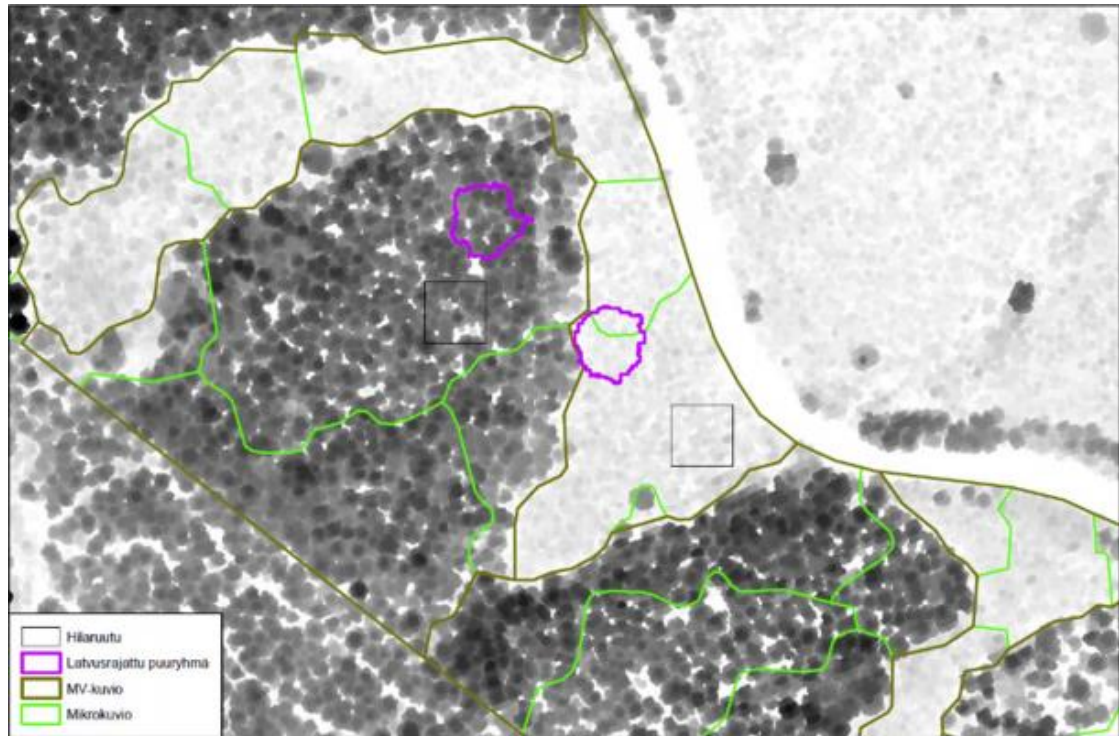
Tiheäpulssiaineistojen ja yksinpuintulkinnan tueksi on kerätty perinteisten maastossa mitattavien ympyräkoealojen sijaan puukarttakoealoja. Puukarttakoealamittauksia on pilotoitu kaksi vuotta (2019 ja 2020) ja menetelmää kehitetään Suomen metsäkeskuksen ja toimijoiden kanssa edelleen. Puukarttakoealoilla pyritään tehostamaan maastossa tehtävää aineistokeruuta; samalta puukarttakoealalta voidaan irrottaa useita piirteitä käytettäväksi koealan lähimmän naapurinmenetelmällä (k-NN-menetelmä) laskentayleistykseen. Puukarttakoeala on esimerkiksi 2000 neliömetrin suuruinen suorakaiteen muotoinen koeala, jonka nurkkapistet tallennetaan tarkkuus-GPS:llä. Koealan jokaisesta puusta tallennetaan puulajin ja rinnankorkeusläpimitan lisäksi puun paikka. Puun paikka saadaan koealalta 10–30 senttimetrin tarkkuudella Terratec Oy:n kehittämällä pseudoliittipaikannuksella. Tiheäpulssiaineistosta kyetään tunnistaa puiden latvustot ja puuston latvusmallin (CHM) paikallisista maksimiarvoista puulle paikka ja pituus. Puukartta-aineisto tuo kyseiselle puulle maastossa mitatut tiedot. (Heikkilä 2021.)



Kuvio 30. Latvusten reunavaikutus rajapuumenetelmässä ympyräkoealalle (Heikkilä 2021)

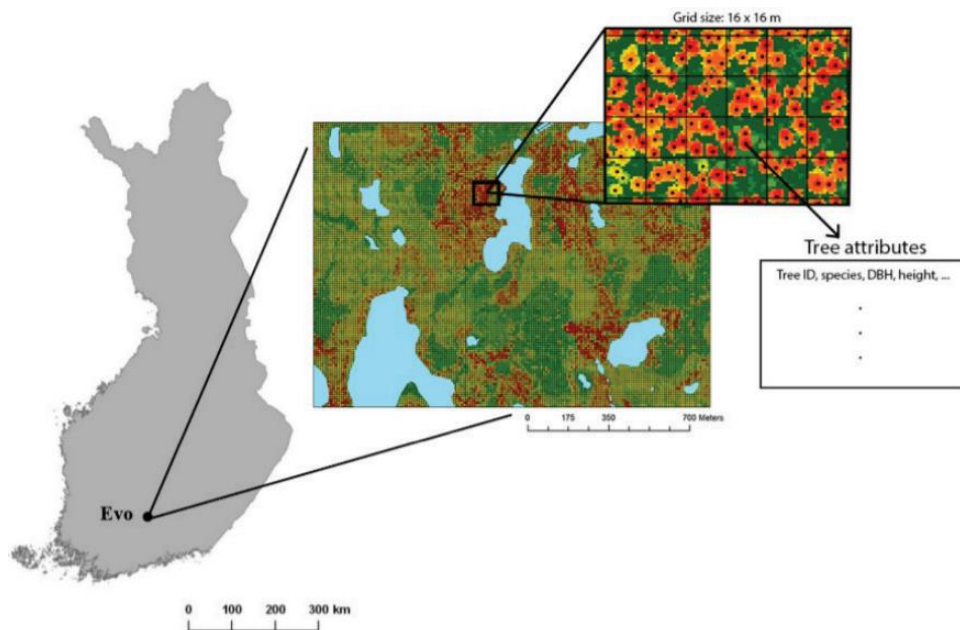
Yksinpuintulkinnan latvusrajauksella puolestaan (kuvio 30) saadaan hila-aineistosta irroitettua terävämpiä laserpiirteitä ottamalla tulkintaan vain maastokoealalla mitattujen runkojen latvukset. Menetelmällä voidaan vähentää latvusten reunaefektin vaikutusta mallinnuksessa ja tulkinta voidaan tehdä vähemmillä maastokoealoilla. (Kilpiäinen 2021.)

Puukarttakoealamenetelmällä pystytään vähentämään reunahilavaikutusta. Reunahilalla tarkoitetaan hilaa, joka jakautuu kahden tai jopa useamman kuvion alueelle. Tällöin yksittäisen hilan metsävaratiedon tarkkuus on heikompi, kuin tapauksessa, jossa hila on kokonaisuudessaan samanlaisessa metsärakenteessa. Puolet hilasta voi olla esimerkiksi 04-kehitysluokan metsässä ja puolet viereisen kuvion T1-taimikossa (kuvio 31). (Heikkilä 2021)



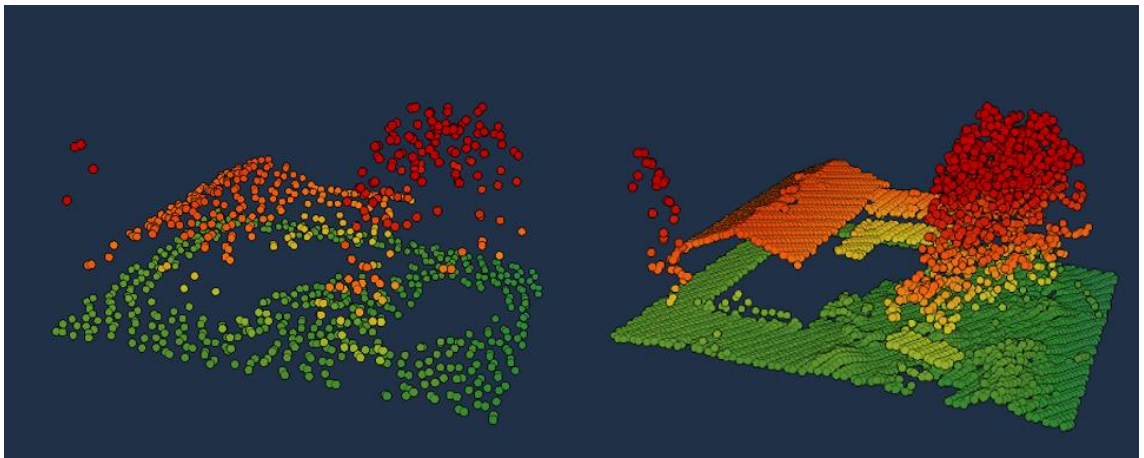
Kuvio 31. Inventointiyksiköt ja tiheäpulsasilaserin ($5\text{p}/\text{m}^2$) latvusmalli (Heikkilä 2021)

Yksinpuintulkinnassa pyritään parantamaan kuvion puulajeittaista tarkkuutta. Lisäksi muodostettavilla runkolukusarjoilla (kuvio 32) on käyttöä avoimen metsävaratiedon soveltajille tarkemmin johdettavine puulajeittaisine tilavuusennusteineen. (Holopainen ym. 2013, 27–29.)



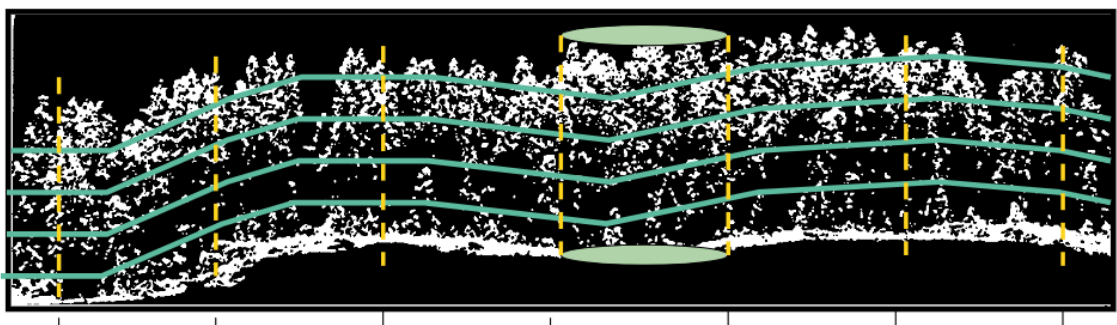
Kuvio 32. Keilausaineistosta muodostettavat runkolukusarjat (Holopainen ym. 2013)

Ensimmäisiä tuloksia laajoista tiheäpulssikeilauksista kesältä 2020 analysoidaan edelleen (4/2021) ja tuloksia odotellaan valmistuviksi kesän 2021 aikana. Keilausdatan tarkkuus parani huomattavasti siirryttäessä harvapulssisesta tiheäpulssikeilaukseen (kuvio 33), mutta datan analysointikehitys on vielä hieman kesken. Ennakkotietojen mukaan tarkkuuksiin (V, PPA, $D_{1,3}$ ja H) on tulossa parin prosenttiyksikön parannus, joten esimerkiksi tilavuuden ja pohjapinta-alan virhe paransi 10 % tuntumaan. Puukarttakoealojen tuomien parannusten testaamista jatketaan kesällä 2021.



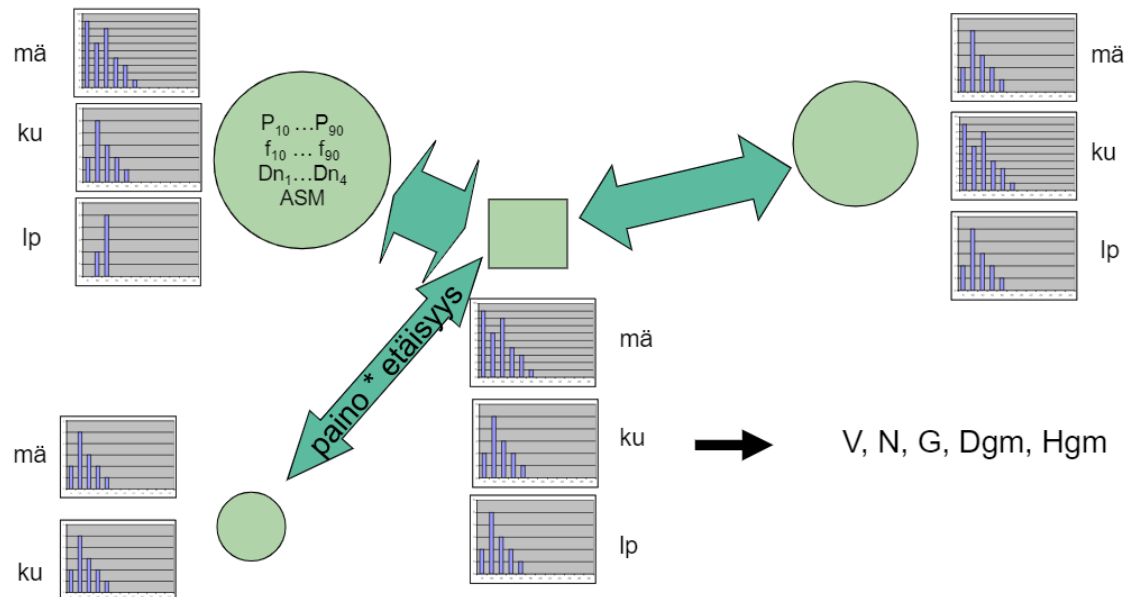
Kuvio 33. Keilausaineisto 0,5 pulssia neliometrille vasemmalla ja 5 pulssia neliometrille oikealla (Heikkilä 2021)

Tiheäpulssiaineistot mahdollistavat monella tapaa tarkempia piirreirrotuksia. Yksi piirretulkinta on jakaa mitatut 3D-pisteet eri korkeusluokkiin. Esimerkiksi kuviossa 34 korkeimman (latva) ja matalimman (maanpinta) väli on jaettu neljään kerrokseen ja piirre muodostuu siitä, kuinka monta prosenttia mitatuista pisteistä on kussakin korkeusluokassa. (Kilpiäinen 2021.)



Kuvio 34. Keilausaineiston pisteiden luokittelu (Kilpiäinen 2021)

Korkeusluokkiin yhdistyvät maastossa mitatut koealan puustotiedot (kuvio 35). Samat puustotiedot voidaan yleistää useampiin hilaruutuihin käyttäen sopivia painokertoimia.



Kuvio 35. Korkeusluokiteltu keilausaineisto (Kilpiäinen 2021)

6 METSÄNARVIOINNIN JA METSÄVARATIEDON UUSIMMAT TYÖKALUT

Laadukkaampi metsävaratieto hyödyttää metsänomistajaa, metsäteollisuutta ja sitä kautta koko yhteiskuntaa. Kaukokartoituksen hyöty voidaan määrittellä laske-
malla kartoituksella saatava työkustannussäästö verrattuna samantasaisen ai-
neiston keruuseen pelkkänä maastotyönä tehtynä. Kuviossa 36 esitetään, kuinka
eri menetelmillä voidaan saavuttaa tarkkuustasot. Satelliittikartoituksen taso on
epätarkin, laserkeilauksella saavutetaan huomattavasti tarkempi metsävaratieto.
Tiettyyn rajaan saakka koealoja lisäämällä näiden molempien metsävaratiedon
tarkkuutta voidaan lisätä, mutta se aiheuttaa myös lisäkustannuksia. Laadukain
metsävaratieto kerätään maastossa mittaamalla, mutta se on samalla kallein
tapa tuottaa tietoa. Uusien mittaus- ja analysointitekniikoiden kehityksessä on
kuitenkin punnittava tapauskohtaisesti myös laadukkaamman aineiston kustan-
nustehokkuus. (Kangas ym. 2019, 9.)



Kuvio 36. Kaukokartoituksen perustuvan metsävaratiedon suhde perinteiseen maastomittausarvioon (Kangas ym. 2019)

6.1 Dronet metsän arvioinnissa

Samaan aikaan kuin keilaimet ja kamerat ovat keventyneet ja monipuolistuneet, ovat erilaiset lennokit ja etenkin dronet kehittyneet leluista ihan oikeiksi työkaluiksi. Niitä käytetään jo varsin yleisesti kuvioittaiseen metsävaratiedonkeruuseen ja metsätilojen arviointiin.

Lentolaserkeilauksen tuottama pistepilvitiheys on vaatimaton verrattuna matalammalla lentävän dronen tuottamaan. ALS tuottaa tiheäpulssikeilaimella aineistoa parhaimmillaan vain kymmenkunta pulssia neliömetrille, kun dronen tuottama keilausaineisto tuotetaan vähintään sadasta pulssista neliömetrille. Dronekeilauksen toivotaan tuovan ratkaisuja mm. hoitamattomien nuorien metsien puustoarviointeihin. (Hokkanen 2015, 16–20.)

6.1.1 Dronet metsätilojen arvioinnissa

Yksinpuintulkinta tuottaa tarkempaa metsävaratietoa kuin aluepohjainen tulkinta. Mutta vain, jos keilausaineisto on tarpeeksi laadukas ja metsä menetelmään optimaalinen. ALS aineiston ongelmana on kuitenkin lintuperspektiivinäkymä ja varsinkin pienempien puiden huono erottuvuus aineistossa. Laskennoista pois jäävät puut aiheuttavat merkittäviä virheitä laskentatuloksissa. Tästä syystä suuremmilla keilausalueilla on pitäydytty aluepohjaisessa tulkinnassa kattavan maastokoealaotannan tukemana. Dronekeilaus ei täysin poista puiden näkymäongelmaa, mutta huomattavasti tiheämpi pulssiaineisto antaa puustotulkinnalle paremmat lähtökohdat. (Holopainen ym. 2015, 48–50.)

Dronekeilauksella tuotetusta aineistosta voidaan yksinpuintulkinnalla ja uusimmilla aineistoa varten kehitetyillä analysointimenetelmillä tuottaa huomattavasti tarkempaa metsätila- ja kuviotason metsävaratietoa kuin ns. perinteisillä menetelmillä. Dronekeilauksen etuna on lisäksi aineiston hankinnan helppous. Alue voidaan keilata ja inventoida uudestaan, jolloin puustotietojen lisäksi saadaan laskettua myös alueelle tarkempia kasvu- tai tuhomuuttujia. (Kallioinen & Laaksonen 2016, 29–34.)

Suomessa dronekeilausta on kehittänyt esimerkiksi Silvere, joka on valmistanut myös eri dronemalleihin asentuvan datankeruuyksikön. Silveren päämenetelmänä tulkinnaassa käytetään yksinpuintulkintaa ja pistepilvistä segmentoidut puut luokitellaan uusimmilla koneoppimismenetelmillä. Näin jokaiselle puulle voidaan arvioida keskeiset tunnuksset (läpimitta, pituus, puulaji) ja kuviolle saadaan muodostettua tarkka puustotieto (pohjapinta-ala, tilavuudet puulajeittain). Tukki-, kuitu- ja energiapuutilavuudet muodostuvat puukohtaisia piirteitä hyödyntäen. (Raitila ym. 2021, 25–26.)

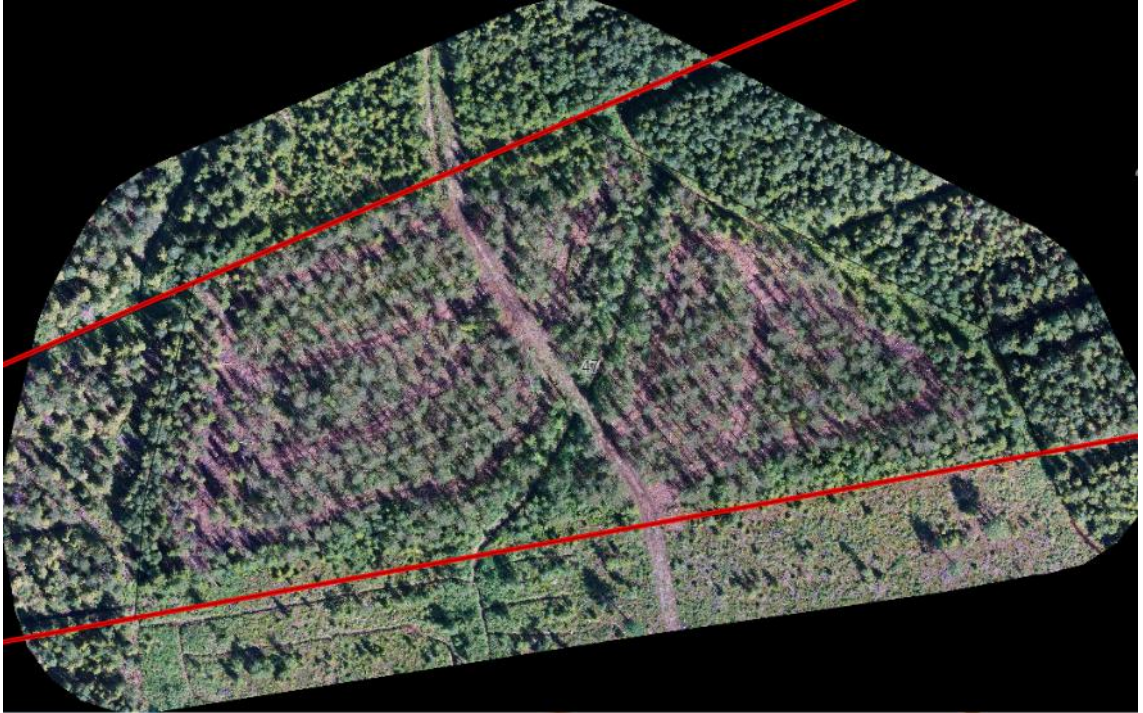
6.1.2 Dronet korjuujälkiä arvioimassa

Metsäkeskus on aloittanut kokeilut dronella tehtävään harvennushakkuun korjuujäljen tarkastukseen. Toimenpidealue kuvataan, materiaalin perusteella kuviolle muodostetaan puukartta, lasketaan kasvatettava puustotieto ja mitataan ajourien leveys, urien kokonaismatka sekä ajouraväli. Jalkatyönä suoritetaan korjuuvaurioiden ja ajourapainumien laskenta, koska ne eivät erotu dronen tuottamasta materiaalista. Kuviossa 37 on ensiharvennusikäisen männikön normaali ilmakehu ennen harvennusta. (Annala 2021.)



Kuvio 37. Männikkökuvio ennen harvennusta, ilmakehu (Annala 2021)

Kuviossa 38 sama mäntymetsä harvennuksen jälkeen. Ajourat erottuvat selkeästi, mutta puiden varjot tekevät silmämääräisestä arvioinnista haastavan.



Kuvio 38. Männikkökuvio harvennuksen jälkeen, dronekuva (Annala 2021)

Kuvankäsittelyalgoritmit löytävät dronen ilmakuvasta latvuspiirteiden avulla puut. Kuviossa 39 on esitetty saman harvennetun metsäkuvion puukartta.



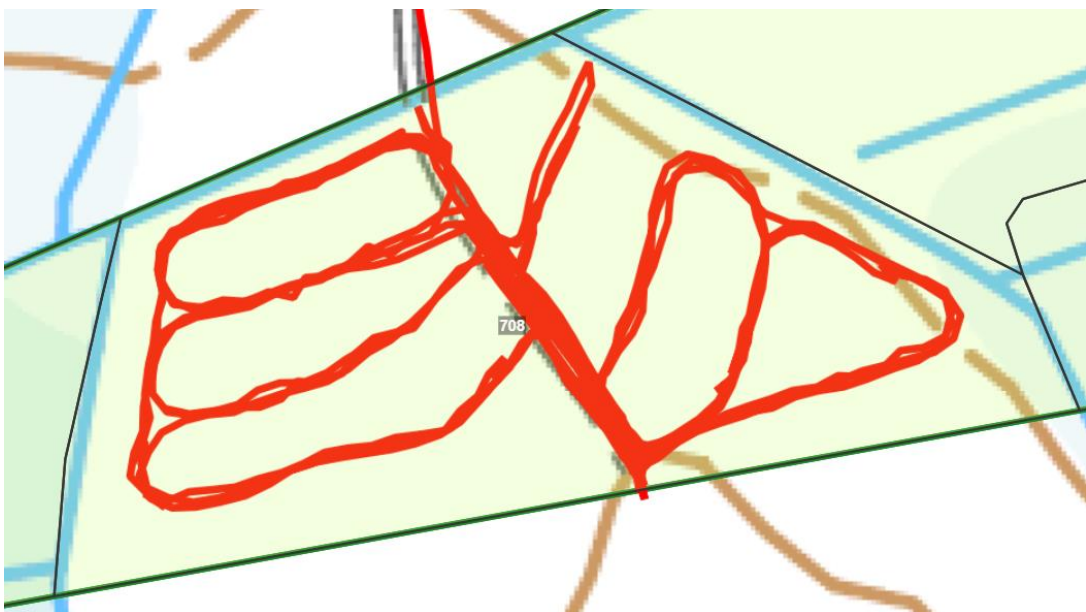
Kuvio 39. Harvennetun kuvion puukartta dronemateriaalista. (Annala 2021)

Myös harvennetun alueen ajouraverkosto tunnistetaan ja urille lasketaan ajouralevytykset ja -pituudet sekä ajouraväli. Dronekuvasta muodostetut ajourat on esitetty kuviossa 40.



Kuvio 40. Harvennetun kuvion ajouraverkosto, dronemateriaali (Annala 2021)

Samasta kohteesta oli tallentunut myös urakoitsijan hakkuu- ja ajokoneen tallentamat gps-jäljet. Dronemateriaalista tulkitut ajourat ovat samat, kuin hakkuukone-gps:n tallentamat ajourat (kuvio 41).



Kuva 41. Harvennetun kuvion todellinen ajouraverkosto moton gps-tallenteena (Annala 2021)

6.2 Metsävaratiedon ajantasaistaminen

Metsävaratiedon ajantasaisuutta on pyritty parantamaan päivittämällä metsävaratietoa metsissä tehdyillä toimenpiteillä. Tällaisia indikaatteja ovat tähän saakka olleet lakisääteinen metsänkäyttöilmoitus ja kemera-tuetut metsänhoitotoimenpiteiden toteutusilmoitukset sekä maastossa tehdyt erilaiset kontrollimittaukset (esimerkiksi taimikonhoidon ja harvennuksen korjuujäljen laatukontrollit). (Heikkilä 2021, 2.)

Metsänkäyttöilmoitusten käyttö ajantasaistuksessa on ongelmallista, koska ilmoitettua toimenpidettä ei ole välttämättä suoriteta suunnitellussa laajuudessa tai toimenpide jää kokonaan tekemättä. Tämä aiheuttaa jatkuvaa korjaustarvetta niin kuvioinnissa, kuin kasvunlaskennassa. 2020-luvulle tultaessa toimijoiden kanssa ollaan pääsemässä järjestelyyn, jossa hakkuukonedataa voidaan hyödyntää metsävaratietojen päivitykseen. Hakkuukoneista siirtyy tehty operaatiotieto (harvennus/uudistushakkuu), ajankohta ja paikkatieto koneen gps-tallennuksesta metsävaratietojärjestelmään, jolloin tehdyn toimenpiteen lisäksi myös kuviorajaus saadaan tarkempaan ja ajantasaisena metsävaratietoihin (Heikkilä 2021.)

Tehdyistä taimikonhoidoista ja nuorenmetsänhoidoista saadaan tarkempaa ja ajantasaisempaa tietoa metsänomistajan tai toimijan omavalvontailmoituksista, joissa on oleellista tietoa kasvamaan jääneen taimikon puulajisuhteista, runkoluvusta, iästä ja pituudesta. Toteutusilmoitusten ja puustotietojen ilmoittamiseen on otettu käyttöön myös sähköisiä ilmoituspalveluita, esimerkiksi Laatumetsä -mobiilisovellus. (Heikkilä 2021.)

Metsänkäyttöilmoituksissa ilmoitetaan hakkuun yhteydessä, onko kyseessä uudistus- vai harvennushakkuu. Uudistushakkuun seuraukset puustolaskentaan ovat selvät: kuviotiedon puustotieto nollautuu ja tehtyjen uudistustöiden jälkeen puustoa kasvatetaan laskennallisesti, joka johtaa taimikon varhishoidon toimenpide-ehdotuksiin. Harvennushakkuu-metsänkäyttöilmoitukseen lisätään tieto, onko kyseessä ensiharvennus- vai harvennushakkuu. Hakkuu aiheuttaa toimenpidealueen puustoon harvennusmallien mukaisen vähennyksen. Se on tähän saakka tehty kuvion pääpuulajin harvennusmallin mukaisesti, mutta parhaillaan

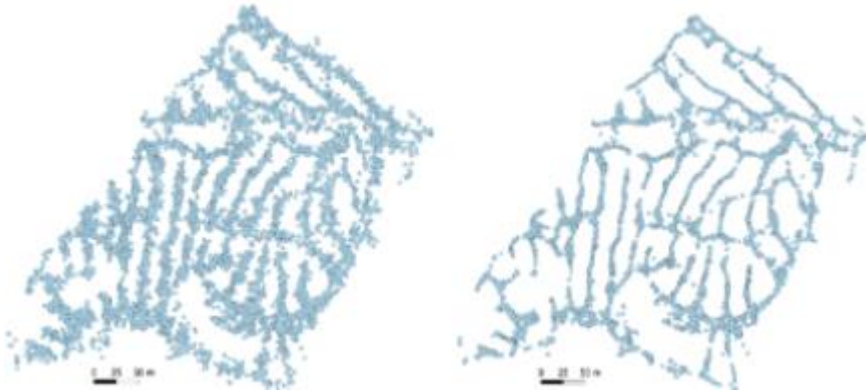
on menossa muutos, jossa harvennusvähennys tehtäisiin käyttäen eri puulajien harvennusmallien yhdistelmää puulajien suhteessa. Metsät ovat usein sekapuustoisia ja metsävarainventointien kehittymisen myötä puulajijakaumat tarkentuvat, jolloin harvennusmallien käyttö puulajien suhteessa tuottaa toimivimman toimenpide-ehdotuksen. Lisäksi uusimmat metsänhoitosuositukset suosittavat seka-puustoisuuden lisäämistä. (Välimäki & Antinluoma 2021.)

Tarkat toteutustiedot luovat tarkemman pohjan laskennalliseen puuston kasvatukseen ja parempaan arvioon harvennusten ajoittamisesta ja hakkuukertymistä sekä metsätilan kokonaispuustosta. Kaikki päivitystieto voi kuitenkin sisältää myös virheitä ja mitä useammasta eri tietolähteestä puustotietoa tuodaan, sitä todennäköisempää on, että osa tuotavasta tiedosta ei ole riittävän tarkkaa, mikä puolestaan aiheuttaa virhettä puuston kasvuennusteisiin ja sitä myötä seuraavien toimenpide-ehdotusten ajankohdan määrittämiseen. Jatkossa kuitenkin laserkeilauskierros suoritetaan kuuden (pohjoisimmassa Lapissa 12) vuoden välein ja keilauskierrosten välissä suoritettava ilmakeilaus vähentävät virheellisten ajantasaustietojen aiheuttamia vääriä laskenta- ja toimenpidetulkintoja (Heikkilä 2021). Mh-toimenpiteiden sekä ensi-, harvennus- ja uudistushakkuiden toteutusten välit ovat lisäksi niin pitkät, että jokaiseen ”kasvatusikkunaan” mahtuu vähintään yksi keilauskierros korjaamaan varatietoa todellisuutta paremmin vastaavaksi.

6.3 Korjuujäljen automaattiset kontrollit

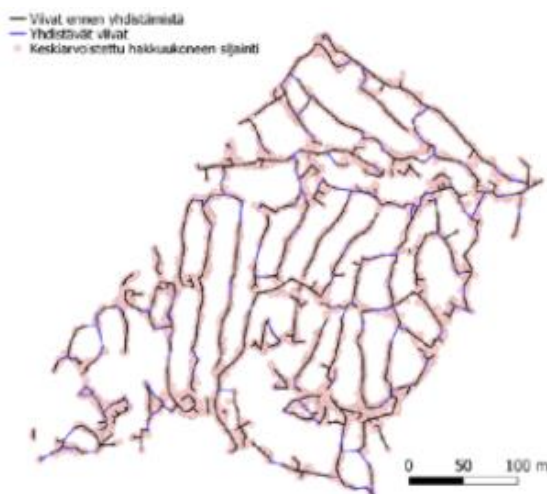
Hakkuita suorittavien metsäkoneiden olisi kohtuullisen luonnollista toimia erilaisien puusto- ja maastotunnusten tuottajina. Lisäänturointi tuo kuitenkin kustannuksia eikä olosuhteetkaan metsäkoneissa ole anturoinnin kannalta helpoimpia mahdollisia. Korjuutyönvalvonta aiheuttaa kuitenkin ihmistyötä ja maastokäyntejä ja Metsäteho onkin projekteissaan tutkinut miten kattavasti metsäkoneet voivat havainnoida ympäristöään jo olemassa olevilla anturoinneilla. Samassa projektissa tutkittiin, miten eri tekniikoilla voitaisiin havainnoida ympäristöä esimerkiksi metsävaratiedon päivitystarkoituksiin. (Ovaskainen 2019a, 6–7.)

Nykyaikaisissa hakkuu- ja ajokoneissa on käytössä gps-laitteet ja niitä käytetään hakkuissa koneiden paikantamiseen työkohteella. Saman paikkatiedon käyttö ajouralaskentoihin on suhteellisen suoraviivaista ja antaa riittävän tarkan ajourapituuden ja ajouravälin epätarkoillakin koneiden gps-vastaanottimilla. Kuviossa 42 on esitetty epätarkemman GPS-vastaanottimen tallettama hakkuukoneen paikkatieto ja miten siitä saadaan keskiarvoistamalla muodostettua ajoura-verkosto. (Rieki, Melkas, Ovaskainen & Poikela 2019, 15.)



Kuvio 42. Vasemmalla suodattamaton, oikealla keskiarvoistettu hakkuukoneen GPS-paikkatieto (Rieki ym. 2019)

Prosessoimalla GPS-paikkatietoa edelleen ja yhdistämällä murtoviivoja ajoura-verkostosta saadaan epätarkemminkin GPS-laitteilla käyttökelpoinen data uravälien ja uraston kokonaispituuden arviointiin (Kuvio 43). Keskiarvoistus poistaa hetkellisiä paikoitusepätarkkuuksia. (Rieki ym. 2019, 15–17.)



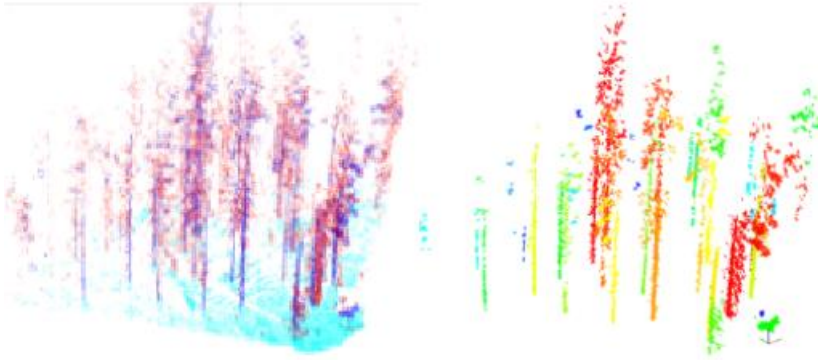
Kuvio 43. GPS-datan prosessointi ajoura-verkostoksi (Rieki ym. 2019)

Samasta paikkatiedosta voidaan muodostaa myös toimenpidekuvion toteutus-tieto, jota voidaan käyttää metsävaratietojen ylläpitotietona kuviorajojen päivitykseen. Lisäksi ajouraverkoston ja koneen sijaintien perusteella voidaan päätellä monimuotoisuustekijöitä eli käsittelemättä jätettävien kohteiden koskemattomuus ja suojavyöhykkeiden jättäminen. (Melkas, Rieki & Sorsa 2018, 14–17.)

Hakkuukoneen varustaminen laserkeilaimella mahdollistaisi sekä kuljettajan opastamisen laadukkaaseen työhöön, että kasvamaan jäävän puuston puustotietojen tarkan määrittämisen. Aalto-yliopiston tutkija Eero Järviluoma tutki diplomityössään erilaisten keilaimien käyttökelpoisuutta hakkuukonemittaukseen ja koneenkuljettajan opastamiseen (Järviluoma, Visala & Melkas 2019, 29).

Korkean mittaustaaajuuden omaavat laitteet sopivat MLS-tyyppiseen keilaukseen ja niissä onkin tarkoitukseen välttämättömät GPS- ja IMU -inputit (paikka- ja asennotieto). Saatavan pistepilven katvealueet pienenevät liikkeestä tapahtuvassa keilauksessa, mutta huonona puolena laitteissa on pieni vertikaalinen poikkeutusmahdollisuus, jolloin oksarajojen ja latvojen havaitseminen varsinkin koneen läheltä on haastavaa. Suuren kallistuskulman keilaavat anturit puolestaan sopivat paremmin TLS-tyyppiseen keilaukseen, koska niiden mittaustaaajuus on pienempi, mutta pistepilven tarkkuus suurempi. Jotta laitteiden tuottamaa pistepilvi-dataa pystyttäisiin hyödyntämään maksimaalisesti, myös algoritmikehitys tulisi tehdä laitekohtaisesti optimoiden. Varsinkin liikkeestä suoritettussa keilauksessa olisi selkeää hyötyä, mikäli pistepilvi-dataa prosessoitaisiin reaaliaikaisesti. Tämä on myös välttämätöntä, mikäli keilausdataa käytetään kuljettajan opastamiseen hakkuutyön aikana. (Järviluoma 2018, 20–25.)

Diplomityössä vertailtiin keilaimien käyttöä pistepilvidatan muodostamisessa, eikä siinä muodostettu puukarttaa tai laskettu puustotunnuksia. Näiden laskeminen datasta kuitenkin katsottiin mahdolliseksi, mutta tämä vaatii kehitystyötä datan suodatukseen (aluskasvillisuus, oksat) ja rungon tunnistamiseen (kuvio 44) (Järviluoma 2018, 57–58.).



Kuvio 44. Pistepilvidata metsiköstä ja datasta generoituja puita (Järviluoma 2018)

Itä-Suomen yliopiston tutkimuksissa Antti Matikainen ja Jyry Eronen pyrkivät tunnistamaan runkoja ja puustovaurioita korjuukohteen valokuvadatasta. Kehitetty Matlab-algoritmi tunnisti vain puolet vauriohavainnoista mutta kuitenkin yli 80 % itse rungoista havaittiin. Parhaiten algoritmi tunnisti työpisteestä kohtisuoraan kameraan näkyvät vauriot ja mitä enemmän vaurio oli rungon sivulla ja alhaalla tai rungossa oli auringon heijastuksia, sitä huonommin algoritmi tunnisti vaurioita. Myös runkojen alaosien oksikkuuden todettiin tuovan omat haasteensa vaurio-tunnistukseen. Tulokset kuitenkin osoittivat, että runkojen ja niihin korjuussa syntyneiden vaurioiden tunnistaminen kuvatunnistusalgoritmeilla on mahdollista, kunhan valaistusolosuhteet ovat kohtuullisen stabiilit ja esteettömät. Tutkimuksessa käytettiin tunnistusmenetelmänä pelkkiä suoria väriarvohavaintoja ilman älykkäitä korjaavia mekanismeja, joten käytettäessä kehittyneempiä kuvatulkintoja jatkossa kamerakuvatulkinnassa on potentiaalia runkojen ja korjuuvaurioiden arviointiin. (Eronen & Matikainen 2019, 39–41.)

Niklas Peltoniemen (Itä-Suomen yliopisto) tutkimuksessa haettiin yhteyttä leimikon kokonaisvaurioasteen ja ajouralle näkyvien vaurioiden suhteeseen sekä laadittiin malli, joka ennustaa kasvatushakkuun jälkeisen puustovaurioprosentin koko leimikolle. Tutkimuksessa löydettiin selkeät korrelaatiot kokonaisvaurioasteeseen vaikuttaviin muuttujiin, joita ovat ajouraväli, poistuman ja jäävän puuston runkoluvut suhteessa uralle näkyvien vaurioiden lukumäärään. Lisätutkimustarpeita ilmeni sää- ja valaistusolosuhteiden sekä näköesteiden vaikutuksesta puustovaurioiden havaitsemiseen, jotta harvennuskohteen kokonaisvaurioaste voitai-

siin ennustaa luotettavasti ja tuottaa puunkorjuun laadunhallintatunnuksia automaattisesti. (Peltoniemi, Eronen, Palander, Ovaskainen & Kärhä 2019, 42–46). Valokuvadatasta voitaisiin myös todentaa esimerkiksi kantokäsittelyaineen leviäminen. (Ovaskainen 2019b, 51)

Jäljelle jäävään puustoon syntyy vaurioita kourakolhaisujen lisäksi myös ajourapainumista. Ajourapainumat aiheuttavat puille juurivaurioita, jotka puolestaan altistavat puut erilaisille tuhomekanismeille. Pohjoisten havumetsien yleisin tuhosiini, juurikäpää, leviää tehokkaasti juurivaurioiden kautta (Piri, Selander, Hantula & Kuitunen 2019, 4–7). Lauri Melander Tampereen yliopistosta tutki TOF-tekniikalla (Time of Flight) toteutetun syvyyskameran soveltuvuutta ajokoneen urapainumien reaaliaikaiseen mittaamiseen. TOF-kameroissa on IR-alueen valolähde ja se mittaa itsensä lähettämän valopulssin kulkuaikaa kohteeseen ja takaisin kennon pikseliin. Kulkuajan perusteella kamera muodostaa kolmiulotteisen kuvan kohteesta.

Projektin tulosten perusteella TOF-tekniikalla voidaan havainnoida koneen jättämiä urapainumia luotettavasti. TOF-kameroita käytetään jo nyt teollisuudessa erilaisissa mittaussovelluksissa, joten kamerat on rakennettu kestäväksi vaihtelevissa olosuhteissa (Melander 2019, 9–12). Luken tutkijat (Alailomäki, Lindeman ja Salmivaara) puolestaan käyttivät urapainumien automaattisen mittauksen kokeisiin 2D-laserkeilainta (Sick LMS-511), jonka todettiin olevan tarkka ja soveltuvan käyttötarkoitukseen hyvin. (Alailomäki, Lindeman & Salmivaara 2019, 12–14). Sekä TOF-kameroiden, että laserkeilaimien asentaminen metsäkoneisiin vain urapainumien mittaamiseen on kuitenkin kallis ratkaisu.

Metsäkoneiden CAN-väylätiedoista voidaan tuottaa monenlaisia hälytysindeksejä. Näiden indeksien perusteella maastotarkastuksia voidaan kohdentaa kohteille, joissa todennäköisyydet vaurioille ovat suuremmat. Tällaisia indeksejä voidaan laatia esimerkiksi koneen kulkuvastusdatasta, joka korreloi koneen tekemiin urapainumiin. Lisääntynyt runkonivelen ohjaustarve voi kertoa kapeasta ajourasta ja ylimääräisestä väistelytarpeesta, jolloin myös juurenniskavauriot yleistyvät. Hakkuukoneen puomin ohjauksen nopeiden korjausliikkeiden lisääntymisellä on suora yhteys syntyneisiin kolhaisuihin puissa. Suuri runkoluku ennen

ja jälkeen harvennuksen lisää myös kourakolhaisujen määrää. (Ovaskainen 2019b, 49–50.)

6.4 TLS/MLS-keilauksen hyödyntäminen mallinnuksessa

LUKE on testannut maalaserkeilausta jo vuodesta 2016 ja mitannut vuosien 2017–2018 aikana yhteensä 250 koealaa, jotka sijoittuvat eri puolille Suomea Hangosta Kittilään. Näillä saaduilla aineistoilla pyritään ratkaisemaan erilaisia mallinnusongelmia. Malleilla puolestaan pystytään ratkomaan esimerkiksi runkotilavuudet nykyistä tarkemmin, koska käyttöön saadaan useampia mitattuja suureita rungon hoikkenemisestä, biomassasta jne. Aiemmin rungon tarkka mittaminen onnistui käytännössä vain kaatamalla puu ja mittaamalla. Nyt sama koeala voidaan keilata myöhemmin uudelleen ja jalostaa edelleen myös muutostietoa ajansuhteen samasta paikasta samoilla puilla. (Pitkänen 2019.)

Tarkemmille mallinuksille onkin tarvetta sillä ilmastomuutos, metsänhoito ja puulajien jalostustyö ovat muuttaneet puiden runkoprofiileja. Vuosikymmenet metsien kuutioinnissa käytössä olleet Laasasenahon yhden, kahden ja kolmen muuttujan funktiot runkotilavuuden laskemiseen ovat käymässä vanhentuneiksi (Laasasenaho 1982. 41–47). Rungot ovat nykymetsissä pidempiä ja hoikempia, mitä 1960-luvulla kerätyssä aineistossa, johon Laasasenahon kaavat perustuvat. Tämä aiheuttaa nykyään jopa 6 % alueellisia virhearvioita kokonaispuuston laskennoissa. Maastolaserkeilaimella (TLS) puustosta saadaan aiempia menetelmiä tarkempia tietoja, joiden perusteella puiden ja puuston mallinnus tarkentuu. (Arbonaut 2015, 40–41., 55.)

Syksyllä 2021 otetaan käyttöön metsävaratiedon laskennassa ja toimenpide-ehdotusten ajoittamisessa uudet päivitetty laskentaytimet. Uusissa ytimissä huomioiduu esimerkiksi taimikkojen varttuminen nopeammin, jolloin taimikonhoitoehdotukset varhaistuvat. Lisäksi varsinkin sekapuustoisten metsien puulajirakenteen vaatimia toimenpiteitä hakkuukertymääräviointeen tarkennetaan. Tähän saakka harvennustarve ja -voimakkuus on arvioitu pääpuulajin mukaan, mutta jatkossa puulajisuhteet vaikuttavat toimenpide-ehdotukseen. (Välimäki & Antinluoma 2021.)

Suomen metsien ensimmäinen keilauskierros saatiin valmiiksi 2020. Kymmenen vuoden keilauskiertoaika on tarkoitus lyhentää jatkossa kuuteen vuoteen ja ilmakuvauskierto kolmeen vuoteen. Vuodesta 2020 eteenpäin saatavista toisen keilauskierroksen tuottamista aineistoista päästään analysoimaan myös muutosta ajan suhteen ja metsävaratietoon saadaan neljäs ulottuvuus: aika. Nämä kolmiulotteisen metsävaratiedon aikasarjat mahdollistavat esimerkiksi kasvun vertailun ja sitä kautta myös uudet analysointimahdollisuudet esimerkiksi kasvupaikkatyyppien arvionteihin. (Holopainen 2019, 1–6.)

VMI-inventoinneissa maastokustannukset muodostavat suurimman kustannuksen, kun taas hila-aineistojen tuottamisessa (SMK:n tuottama metsävaratieto) koealojen osuus kustannuksista on vain 5 % luokkaa. Maastotöiden päällekkäisyyden vähentämiseksi on SMK ja Luke ovat kokeilleet maastokoealojen yhteiskäyttöä, joiden perusteella VMI:lle on tehokkaampaa käyttää omiin tarpeisiin optimoituja koealoja ja SMK:n kannattaa testata erilaisia koealatyyppejä eri puolella Suomea. (Arbonaut 2015, 52–54.)

6.5 Hyperspektrikamerat kehittämässä uutta

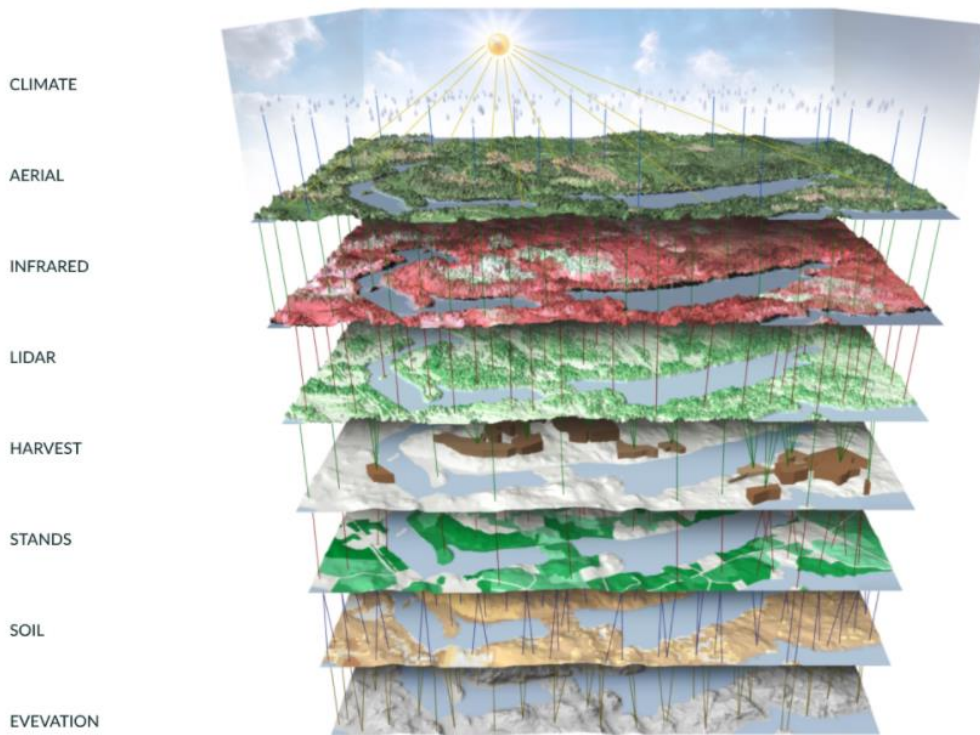
Hyperspektrikameroilla löydetään uusia, vielä osin tuntemattomiakin mekanismeja inventointeihin ja ympäristön tilan analysoinnin tueksi. Hyperspektrikuvauksen kehittyminen hyödyttää jatkossa metsäntutkimusta ja ilmiöiden mekanismien tunteminen auttaa mittalaitteiden ja antureiden kehitystyössä (Eskelinen 2019, 39). Esimerkiksi Samuli Junttilan väitöskirjatutkimuksissa kuvattiin hyperspektrikameralla terveitä ja kuivuudella stressattuja kuusia ja mäntyjä. Aineistosta havaittiin kuivuusstressin aiheuttaman vesipitoisuuden laskun näkyvän neulasissa selkeinä poikkeamina aallonpituusalueilla 1550 ja 690 nanometriä. Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa monikanavalaserkeilaimella keilatusta aineistosta analysoimalla samoja aallonpituusalueita voitiin luotettavasti havaita esimerkiksi kirjainpainajan heikentämiä puita jo ennen kuin epidemia on visuaalisesti nähtävissä. Keilaimiin tai satelliittitutkiin voidaankin jatkossa kehittää eri mitattavia spektrialueita hyvinkin tarkalle taajuuskaistalle, kun tunnetaan paremmin ilmiö, jota ollaan havainnoimassa. (Junttila 2019, 15–17.)

Fluoresenssiin perustuvan kaukokartoituksen, joilla pystytään indikoimaan fyysikaalisen mallinnuksen avulla ilmiötä aivan uusilla tavoilla. Tutkimalla kapeaa aallonpituuskanavaa ja sillä tapahtuvaa fluoresenssi-ilmiötä, joka korreloi voimakkaasti puiden kasvun ja terveyden kanssa. (Holopainen 2019.)

6.6 Tekoälyn hyödyntäminen

Suomalainen Bitcomp Oy on toteuttamassa 2019 alkanutta EnviNavigator -hanketta, jonka osarahoittajia on mm. Euroopan avaruusjärjestö ESA. Projektin tavoitteena on kehittää satelliittiseurantaan perustuvia metsäpalveluita, jotka hyödyntävät itseoppivaa tekoälyä. Tähän saakka satelliittidatasta on kyetty luomaan luotettavia metsävara-aineistoja vain yli sadan hehtaarin alueille, mutta käytettävissä olevan datan tarkentuminen, tekoälyn mahdollistamat itseoppivat järjestelmät ja lisääntynyt laskentakapasiteetti tuovat metsävaratietojen hyödyntämiselle uusia mahdollisuuksia. Projektissa on tarkoitus käyttää vuosien aikana maastossa mitattuja koealatietoja sekä laserkeilauksen tuottamaa metsävaratietoa ja täydentää sitä satelliittiaineistoihin ja tuottaa näin metsäammattilaisille ja metsänomistajille ajantasaisempaa tietoa metsien nykytilasta, riskeistä ja muutoksista. (BitComp 2020.)

Myös suomalais-saksalainen CollectiveCrunch on kehittänyt metsävaratietojen ja metsäsuunnittelun tueksi tekoälypohjaisen ohjelmistokokonaisuuden metsävaratietojen hallintaan ja metsänkäyttöpäätösten tueksi. Linda Forest -ohjelmistossa hyödynnetään eri tietolähteitä muodostaen datoista erilaisia toimenpide- ja ominaisuustasoja (kuvio 45). Kokonaisuustarkastelusta syntyy monipuolinen metsäsuunnitelma laajoille alueille. Linda Forest:ia käyttävät Suomessa Tornator ja Metsähallitus ja kokonaisuunnitteluala on Linda Forest:ssa jo 15 miljoonaa hehtaaria. (CollectiveCrunch 2021.)



Kuvio 45. Linda Forest -ohjelmiston GIS-tasoja (Collective Crunch)

6.7 Fotonilaskentaan perustuva keilaus

VTT:n projektin (DigilInventory) yhtenä osa-alueena tutkittiin fotonilaskentaan perustuvaa laserkeilausta (SPAD-Lidar). Perinteisen laserkeilain mittaa lähettämänsä laservalon takaisinheijastumaa, mutta ilmaisinsä on rakennettu analogisella elektroniikalla. Tämä tarkoittaa, että käytännössä ilmaisinsä reagoi vasta kun fotoneja osuu siihen suuruusluokaltaan 400–500 kappaletta, SPAD-kennolla erotteilykyky on yksi fotoni. SPAD-kenno toimii kuin digitaalisen kameran kenno sillä erotuksella, että kameran pikseliin tallentuu kohteen väri, SPAD-kennon havaittua fotonin pikseliin tallentuu etäisyystieto. (Raitila ym. 2021, 18–19.)

SPAD-etäisyysmittaus perustuu aikaporttaukseseen ja yhden fotonin tunnistamiseen puolijohdediodin avulla. Kohdetta valaistaan lyhyillä, 100–200 pikosekunnin (eli n. 3 cm pituisilla) laservalopulsseilla. Kameran suljimen tapaan toimiva aikaportti avataan sekunnin miljardisosan ajaksi ja ilmaisinsä kertoo tuliko valofotoni vai ei. Tietona tapahtumasta rekisteröityy, oliko kohde kyseisellä etäisyydellä vai ei. Sen jälkeen portin aktivointiajankohtaa viivästetään askel kerrallaan, kunnes

koko mittausalue (=mittausvyvyys) on skannattu läpi ja ”kyllä foton tuli”-etäisyys-pikseleistä muodostuu 3D-kuva. SPAD-tekniikalla toteutettu etäisyysmittaus toimii pienellä optisella valaistuksella (pieni energiankulutus), sietää hyvin taustavaloa ja toimii ilman mekaanisesti liikkuvia osia. (Ruokamo 2019, 21–36.)

VTT:n DigilInventory -projektissa kokeiltiin SPAD-Lidar-etäisyyskameraa puunrungontunnistukseen ja vertailtiin mittaustuloksia kaupallisen ZEB-Horizon -käsi-laserkeilaimen tuottamaan pistepilveen. Kuviosta 46 huomataan, kuinka käsi-keilaimen käsittelemätön 3D-pistepilvidata on enemmän valokuvankaltainen, mutta puun rungosta heijastuneet pisteet hukkuvat oksista ja neulasista heijastuneisiin pisteisiin, jotka muodostavat valtaosan 3D-pistejoukosta. SPAD-Lidarilla voidaan suodattaa tarpeetonta pistedataa pois ja oksiston seasta hahmottuu kuusen runko, vaikka sen hahmottaminen ihmissilmin on lähes mahdotonta. (Raitila ym. 2021, 49–53.)



Kuvio 46. Testi kuusi ja ZEB Horizonin (keskellä) ja SPAD-Lidarin (oikealla) (Raitila ym. 2021)

Erilaisten ympäristön 3D-mallintamiseen sopivien keilaimien kehitys on ollut nopeaa. Metsänmittaukseen soveltuvat toteutukset odottavat seuraavaksi algoritmikehityksen ratkaisuja, jotta nopeasti kerättävissä olevasta ja runsaasta 3D-pistepilvestä kyettäisiin tunnistamaan puun rungon dimensiot ja laatuparametrit.

SPAD-Lidar -kehitystyö tuo ratkaisuja konenäkösovelluksiin ja ensimmäisiä sovelluskohteita tulevat olemaan robotiikan sovellukset ja autonomisten työkoneiden ympäristönhavainnointi. Kaukokartoituksessa SPAD tekniikan käyttöönotto monikanavakeilaimissa voisi mahdollistaa saman pistepilvitarkkuuden kolmen kilometrin korkeudesta, mitä nykyisillä monikanavakeilaimilla saadaan kuudesta-sadasta metristä keilaten. (Ruokamo 2019, 7; Holopainen 2019.)

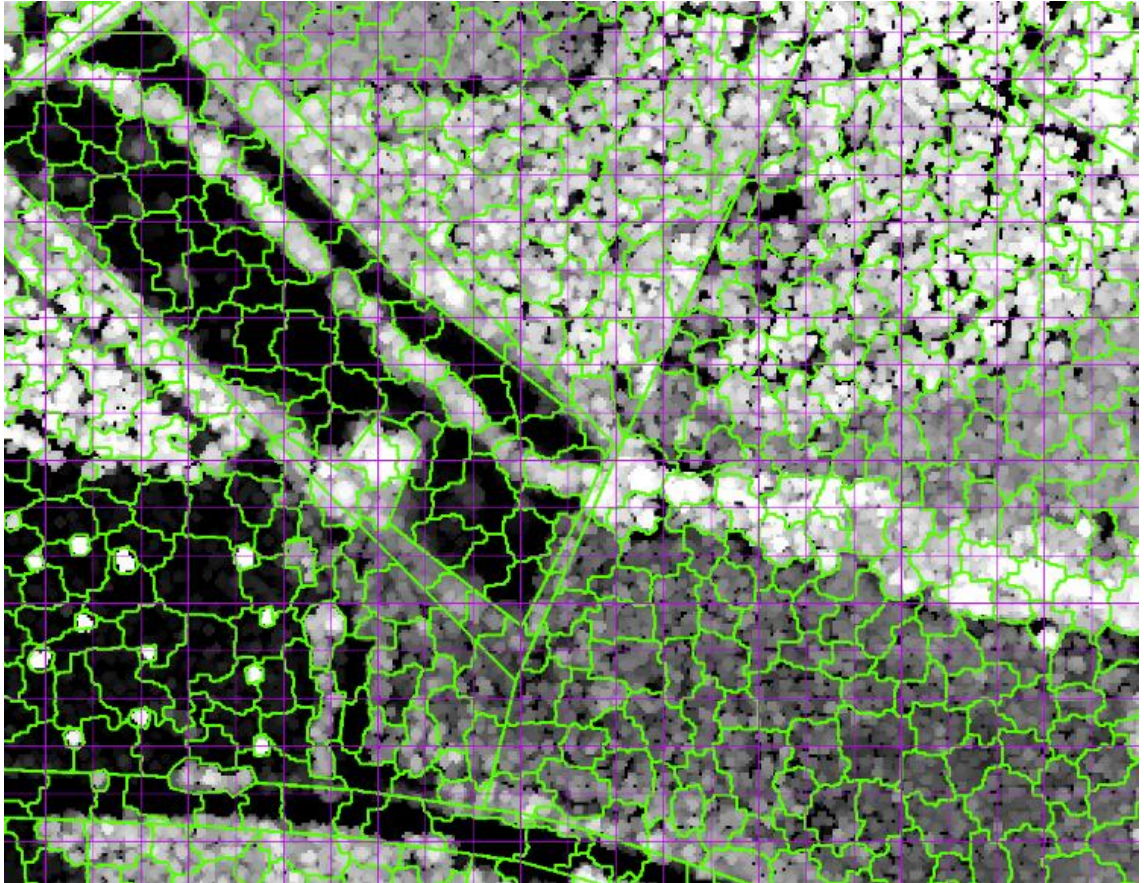
6.8 Uusi metsä- ja luontotietojärjestelmä käyttöön 2022

Suomessa otetaan käyttöön uusi metsä- ja luontotietojärjestelmä vuonna 2022. Uuden metsävaratiedon tuottamiseen otetaan maastokoealoina jatkossa käyttöön vaihteittain puukarttakoealat (vuoteen 2022 mennessä). Perinteisiä ympyräkoealoja tarvitaan kuitenkin jatkossakin täydentävinä referensseinä esimerkiksi nuorissa metsissä. Kuvioinnissa otetaan käyttöön jatkuva malli, jota automatisoidaan ja tehostetaan esimerkiksi hakkuukoneiden gps -tiedolla. Toteutustiedot (hakkuukone ja omavalvonta) ajantasaistavat jatkossa metsävaratietoa ja kuviotietojen lisäksi myös hilatieto pidetään ajan tasalla. Taimikkotieto tuotetaan jatkossa ilman maastotyötä uudistustavan ja kasvupaikkatyyppin tietoja hyödyntämällä. (Heikkilä 2021.)

Tiheäpulsssiaineistojen tuo uudet mahdollisuudet luontotiedon (monimuotoisuus, luontoarvot ja vesiensuojelu) tuottamiseen kaukokartoitusaineistoista. Tiheäpulsssiaineistosta erottuu aiempaa paremmin esimerkiksi metsän kerroksellisuus, vanhat metsät ja säästöpuuryhmät. Arvokkaat elinympäristöt ja metsälakikohteet vaativat jatkossakin metsäammattilaisen jalkautumisen maastoon, mutta kaukokartoitusaineistoista voitaisiin löytää uusia luontokohteita. Tulevassa uudessa metsä- ja luontotietotietojärjestelmässä esimerkiksi luontotiedot ovat omina aineistoinaan ja muodostavat oman tietotason. (Heikkilä 2021.)

Metsävaratiedon tuottamisessa hila pysyy jatkossakin tulkintayksikkönä ja hila sekä kuvio mv-tiedon esityksikkönä. Tulkinnassa ollaan ottamassa hilatulkinnan (16 x 16 m hilaruutu, joka vastaa 9 m säteistä ympyrää, 256 m²) lisäksi mukaan latvusrajattua (noin 250 m²) tulkintaa. Latvusrajaustulkinnan etuna on teräväpiirteisemmät laserpiirteet (puuryhmä) ja reunahilavaikutuksen väheneminen

kuvioiden rajoilla. Myös kuvion sisäisen vaihtelun vaikutus voidaan huomioida paremmin. Kuvio 47 näkyy selkeästi, kuinka paljon metsikkökuviolla voi olla ns. reunahilaruutuja (eli hila jakautuu useammalle kuviolle).



Kuvio 47. Hilaruudun (violetti) ja latvusrajatun (vihreä) tulkintayksikön ero (Kilpiäinen 2021)

7 METSÄVARATIETO TULEVAISUUDESSA

Lähivuosina nähdään, kuinka paljon metsävaratieto tarkentuu ja kuinka paljon maastotyötä voidaan vähentää käyttämällä uusia ja tarkempia kaukokartoitusaineistoja. Maastotyötä voidaan vähentää myös kohdistamalla koealamittauksia enemmän metsätyyppeihin, joiden metsävaratietoa voidaan maastomittauksin eniten tarkentaa. Myös tekoäly voi parantaa kaukokartoitus pohjaista metsävaratietoa ja tuoda kustannustehokkuutta.

Tekoälysovellusosaaminen mahdollistaa jatkossa valtavan koealamittausdatan (sata vuotta mittaustietoa), tarkempien satelliittiaineistojen (hyperspektri- ja fotonitekniikka), metsiin tehtyjen hoito- ja hakkuutoimenpiteiden tarkempien tietojen hyödyntämisen metsävaratiedon analysoinnissa ja ajantasaistamisessa. Lisäksi tekoälymallien opetusaineistona voitaisiin käyttää motojen hakkuudataa, joka on kuitenkin tarkinta käytettävissä olevaa puustodataa.

Toisen keilauskierroksen tuomien aineistojen myötä, muutoksen mittaaminen monipuolistuu, jolloin myös kasvupaikkojen kasvumallit voivat tarkentua. Nykyään kaukokartoitusaineistojen ja tulkintojen epätarkkuudet ovat niin suuria, ettei vuosikasvuissa voida vielä huomioida esimerkiksi erilaisten kesien lämpösummaeroja, ojitusten tai lannoitusten tuomia kasvulisäyksiä, taimikonhoidon ja harvennushakkuiden ajoitusten ja voimakkuuksien eroja ja niiden tuomia erilaisia pienialueisia lisäkasvuja metsissä Tämä vaatii tarkan metsävarainventoinnin lisäksi myös simulointi- ja optimointiohjelmilta monipuolisempia mahdollisuuksia ottaa huomioon muuttuneita olosuhteita tai tehtyjä toimenpiteitä.

Tekniikan kehittyessä hakkuukoneet muuttuvat entistä automaattisemmiksi ja myöhemmin myös itsestään työtä tekeviksi. Aluksi anturi- ja kamerateknologiat tulevat hakkuukoneissa opastamaan kuljettajaa työssään, mutta jatkossa ne tallentavat samalla kasvamaan jääneen puuston tiedot. Hakkuukoneiden lisääntymistä pyritään kuitenkin kustannussyistä välttämään ja lisääntymisen tarpeelle pitää olla sekä tarve mitata, että investoinnille ja datan käsittelylle kustantaja. Todennäköisimmin toimivia laiteratkaisuja löydetään myös esimerkiksi pelimaailmo-

jen kehittäjiltä (kameroiden käyttö, ympäristön havainnointi ja visualisointi/mittaamisen algoritmit) tai autoteollisuuden käyttämistä antureista (erilaiset ympäristöä havainnoivat anturit esim. törmäysvaroittimissa). Autoteollisuuden anturiratkaisut ovat valmistusmäärien lisäksi kehitetty kestävämmän vaikeissa olosuhteissa. Yksinomaan metsänmittaamiseen tarkoitettujen instrumenttien markkinat ovat yhtä aikaa sekä rajalliset, että maastokelpoisuuden suhteen haastavat.

Kuvaamisen monipuolistuessa, varsinkin droonien yleistyessä, potentiaalista analysoitavaa kuvamateriaalia saadaan metsistä entistä helpommin. Tähän tarkoitukseen tarvittaisiin ohjelmistokehitystä myös kuvien analysoinnin puolelle, nimenomaan metsänmittaukseen erikoistuen, jotta yhä useampi aineisto päätyisi metsävaratietoa kartuttamaan. Trestiman -tyyppisellä palvelualustalla jokainen metsänomistaja voisi kuvata ja ajantasaistaa itse omaa metsävaratietoaan.

Liki kaiken muuttuessa jatkossa mahdolliseksi, muutokselle haetaan luonnollisesti maksajaa. Metsänomistajan ja yhteiskunnan hyödyt tarkasta ja ajantasaisesta metsävaratiedosta ovat selvät. Mutta kuinka paljon enemmän tarkka metsävaratieto voi maksaa? Vuosituhannen taitteessa Metsäkeskuksen maastotyönä kerätyn maastotyön hehtaarihinta oli 16-17 euroa. Laserkeilausaikakauden siirtyminen 2010-luvulla pudotti tiedonkeruun hehtaarikustannukset nykyiselle 4-5 euron tasolle. Kustannusten oletetaan 2020-luvulla vakiintuvan 2-3 euroa hehtaaria tasolle. Kustannusten putoamisen myötä tiedon laatu ja käyttökelpoisuus kuitenkin paranevat uusien menetelmien myötä. Uuden kehittäjät ovat tuotekehityskustannusten kanssa tiukan paikan edessä.

Kaukokartoitusaineiston nopea kerääminen laajalta alueelta tarkoittaa poikkeuksetta kuvantamista lintuperspektiivistä. Pitkä analysointihistoria osoittaa, että puun pituudesta johdettu läpimitta on aina epätarkempi johdannainen kuin läpimitasta johdettu pituus. Tästä lähtökohdasta mietittynä haasteita tulee riittämään.

8 POHDINTA

Tekniikan kehittyminen on mahdollistanut ja mullistanut vuosikymmenten aikana monen asian ja kehittymisen vauhti sen kun kiihtyy. Voiko metsänmittaus perustua tulevaisuudessa pelkkään kaukokartoitukseen? Sellainen on ollut tavoitteena jo vuosia, mutta uusimmatkaan kaukokartoitusaineistot uusimpine tulkintoineen eivät kuitenkaan vielä tuota riittävän tarkkaa metsävaratietoa metsätilatason metsäsuunnitteluun.

Entä voiko metsänmittaus ja -inventointi saavuttaa tason, ettei tarkkuuden lisääminen ole enää tarpeellista? Metsäteollisuuden varastot siirtyvät yhä enemmän pystyvarantotietoon ja puukauppa sähköistyy. Sikäli tarkemmalle metsävaratiedolle on tilausta. Jos joku vuosikymmen pari sitten heitti arvion, että jokainen puu saa oman id:n, olisi ideaa pidetty mahdottomana. Mutta pidetäänkö enää? Vuosituhannen vaihteeseen saakka metsieninventointi ja -arviointi on pyrkinyt tarkempiin arvioihin ja ennusteisiin ikään kuin tekniikkaa odottaen: vielä vuonna 2004 todettiin, että tarkempiin arvioihin tarvittaisiin metsistä 3D-mittauksia. Tekniikan kehitys tuo jo käyttöön hyperspektri- ja fotonilaskentaan pohjautuvia kuvantamismenetelmiä, vaikkei kaikkia tiheäpulsssiaineistojenkaan mahdollisuuksia vielä tunneta. On siirrytty aikaan, jossa tekniikka mahdollisuuksineen on mennyt jopa sovellustaso-osaamisen ja tarpeen tiedostamisen edelle.

SPAD-SLAM-Lidar ja sekunnin pilkkominen miljardisosaan ja ympäristön havainnointi yhden saapuneen valofotonin tarkkuudella ja säteilyenergi-spektrin osittaminen hyperspektrikameralla tuottamasta datasta satoihin tai tuhansiin eri aallonpituutta tallentaviin kanaviin tuovat metsäarviointeihin ja kaukokartoitukseen aivan uudet mahdollisuudet. Ensimmäisiä soveltamisalueita ovat todennäköisesti metsän terveyteen liittyvät ratkaisut. Tällainen voisi olla esimerkiksi kirjanpainaja-epidemian tarkka rajaaminen spektrikameroin ja hoitohakkuun kohdentaminen vain sairastuneisiin puihin.

Tarvetta tarkemmalle ja ajantasaiselle metsävaratiedolle on jatkossa yhä enemmän. Maastotyön kalleus kaikissa metsäsuunnittelun vaiheissa odottaa ratkaisuja kaukokartoitetun, ajantasaisen ja tarkan metsävaratiedon puolelta. Metsäomistaminen ja tavoitteet monipuolistuvat. Etämetsänomistamisen lisääntyminen ja

metsänomistajien kaupunkilaistuminen tuovat samaan aikaan myös tarpeen monipuolisemmalle metsävaratiedon esittämiselle. Tällöin metsävaratiedon tulisi sisältää myös enemmän erilaisia luontoarvoihin liittyviä elementtejä. Luonnon monimuotoisuuden kartoitustiedot palvelevat toki myös talousmetsissä tehtävää metsäsuunnittelua. Kuutiotilavuuden tarkkuuden lisäksi puulajisuhteiden ja puutavaralajien tarkkuuksiin odotetaan parannuksia. Tämä helpottaisi myös runkohinnoittelun yleistymistä, joka yksinkertaistaisi puukauppatarjousten vertailua ja vähentäisi epäilyjä tukkien päätyemisestä kuitupinoon.

Maailmalla, jossa metsät ovat vähentyneet ja metsien käytöstä ollaan huolissaan, aiheuttaa katseiden kääntymisen luonnollisesti sinne, missä metsiä on runsaasti olemassa. Suomen olisikin tärkeä kyetä osoittamaan EU:lle pitkällä inventointihistorialla, kuinka metsiä voidaan samalla kertaa sekä hyödyntää, että huolehtia metsäpinta-alan ja puustovarannon säilymisestä, luonnon monimuotoisuutta unohtamatta. Metsäosaaminen voisi näin olla myös oiva vientituote.

VTT:n projektin aikana (2019–2021) metsänmittaus ja -analysointi aiheista julkaistiin uusia tutkimustuloksia enemmän kuin runsaan kymmenen vuoden ajankaksolla ennen projektia. Tästä syystä opinnäytetyön aihe oli ajankohtainen ja aiheen rajaus, laajuudestaan huolimatta, onnistunut. Kartoitus-, mittaus- ja analysointimenetelmien kehitys on vaikuttanut ja vaikuttaa jatkossakin kaikkiin metsätiedon osa-alueisiin. Kokonaisuudesta tuli kuitenkin niin valtava, että fokuksen pitäminen terävänä ja sopivan käsittelysyvyyden löytäminen kuhunkin aihealueeseen, aiheuttivat haasteita ihan opinnäytetyön valmistumiseen saakka. On mielenkiintoista nähdä jatkossa, miten nopeasti uusimmat tekniikat (etenkin hyperspektrikamera tai fotonilaskenta) ja menetelmät (latvusrajaus tai tekoäly) tulevat muuttamaan metsävaratietokokonaisuutta.

Miettiipä asiaa kummasta päästä hyvänsä: fotonilaskennassa sekunnin pilkkomista miljardisosiin ja muutaman sentin pituista valopulssia, tai istutetun puun tulevaa, satojenkin vuosien elämää, niin metsänarvioinnissa ollaan kyllä ääripäi-
neen mahdollisuuksien äärellä. Kaikella on kuitenkin hintansa. Kustannustehokkuus ja metsänarviointiin käytetyn panostuksen tuoman hyödyn arviointi on yhtä tärkeää kuin metsänarviointi itsessään. Lisäksi on muistettava metsien kasvun

perusmekaniikka, jota tarvitaan simulointityökalujen ja kasvumallien kehitystyössä. Huikeinkaan tekniikka ei lisää puun kasvua, joka on kuitenkin se metsässä tapahtuva tärkein asia. Tekniikan kehityksen vauhtisokeudessa on vaara keskittyä lillukanvarsien tutkimiseen. On löydettävä oleelliset mittaus- ja analyysitekniikat keskeisimpien ongelmien ratkaisuun. Kun puu kasvaa sata vuotta, niin kasvun tai puun itsensä tarkasteluun on kyllä aikaa.

LÄHTEET

Alailomäki, J., Lindeman, H. & Salmivaara, A. 2019 Urapainumien mittaaminen 2D-laserskannerilla. Teoksessa H. Ovaskainen (toim.) Kohti automaattista puunkorjuun laadunvarmistamista. Metsätehon raportti 251. Vantaa: Metsäteho Oy, 12-14. Viitattu 20.3.2021 https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkorjuun_laadun_mittaamista.pdf.

Almeida, D., Stark, S., Shao, G., Schietti J., Nelson B., Silva, C., Gorgens, E., Valbuena, R., Papa, D. & Brancalion, P. 2019. Optimizing the remote detection of tropical rainforest structure with airborne lidar: leaf area profile sensitivity to pulse density and spatial sampling. *Remote sensing journal*. Viitattu 10.10.2020 https://www.researchgate.net/publication/330203798_Optimizing_the_Remote_Detection_of_Tropical_Rainforest_Structure_with_Airborne_Lidar_Leaf_Area_Profile_Sensitivity_to_Pulse_Density_and_Spatial_Sampling.

Annala, M. 2021. Metsäverkko. Viitattu 3.3.2021 www.metsaverkko.fi.

Arbonaut 2015. Metsätieto 2020–Tavoitetila. Viitattu 15.10.2020 <https://mmm.fi/documents/1410837/1504826/Mets%C3%A4tieto+2020+Tavoitetila/d3e572a8-eb0b-4715-80ac-fe04dc45b2ca/Mets%C3%A4tieto+2020+Tavoitetila.pdf>.

Bitcomp 2021. Satelliittimonitorointi ja tekoäly ovat osa uuden sukupolven metsänhoitoa. Viitattu 15.3.2021 https://bitcomp.com/fi/2021/01/11/satelliittimonitorointi-ja-tekoaly-ovat-osa-uuden-sukupolven-metsanhoitoa/?fbclid=IwAR1SHt4ia5K1hJ0zSAbEEUS-FDoCVb9ml_Nzm0ZQ23Tm9Xn5mndsaeXhiZfs.

Cajander, A.K. 1925. Metsätyyppiteoria. *Acta Forestalia Fennica* 29(2), 1–84.

CollectiveCrunch 2021. Linda Forest. Viitattu 10.4.2021 <https://www.collectivecrunch.com/linda-forest-the-leading-ai-solution-for-the-forestry-industry/>.

Eronen, J. & Matikainen, A. 2019. Puustovaurioiden automaattinen tunnistaminen valokuvista. Teoksessa H. Ovaskainen (toim.) Kohti automaattista puunkorjuun laadunvarmistamista. Metsätehon raportti 251. Vantaa: Metsäteho Oy, 38-41. Viitattu 20.3.2021 https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkorjuun_laadun_mittaamista.pdf.

Eskelinen, M. 2019. Computational Methods for Hyperspectral Imaging Using Fabry–Perot Interferometers and Colour Cameras. Jyväskylän yliopisto. Informaatioteknologian tiedekunta. Väitöskirja. Viitattu 10.2.2021 <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/66542#>.

Gisgeography 2019. Multispectral vs Hyperspectral Imagery Explained. Viitattu 17.10.2019 <https://gisgeography.com/multispectral-vs-hyperspectral-imagery-explained/>.

- Haara, A. & Kangas, A. 2019. Puulajivirheiden vaikutus puukaupparjoustien paremmuuden arvioimiseen sekä odotettujen ja toteutuvien tulojen eroihin sähköisessä tarjouskilpailutilanteessa. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2019 artikkeli id 10079. Viitattu 12.1.2021 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article10079.pdf>.
- Hamilo, M. 2010. Laser viime vuosisadan loistavin keksintö. Tiede 9.7.2010 Viitattu 12.12.2020 https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/laser_viime_vuosisadan_loistavin_keksinto.
- Harju, M. 2017. Aaltomuoto. Valotekniikan materiaaleja. Näyttämövalaisun perusteet. Valo ja värit. Viitattu 13.12.2020 <https://aaltomuoto.wordpress.com/valo/nayttamovalaisun-perusteet/valo-ja-varit/>.
- Heikkilä, J. 2021. Inventoinnin menetelmäkehitys. Suomen metsäkeskus. Inventoinnin koealamittausten orientoiva Teams-koulutus, 8.4.2021.
- Hokajärvi, R. 2012. Metsäsuunnitteluprosessin kehittäminen -yksityismetsien suunnittelutoiminta ja sen historiallinen kehitys muutoksen suuntaajana. Helsingin yliopisto. Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. Metsätieteiden laitos. Väitöskirja. Viitattu 12.20.2020 <https://dissertationesforestales.fi/pdf/article1926.pdf>.
- Holopainen, M., Vastaranta, M. & Hyyppä, J. 2014. Yksityiskohtaisen metsävaratiedon tuottaminen -kohti täsmämetsätaloutta. Metsätieteen aikakauskirja 4/2014. Viitattu 15.12.2020 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article5883.pdf>.
- Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden julkaisu 7: 1-152.
- Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. & Hyyppä, H. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol 22, no. 3, 2011. Viitattu 18.8.2020 https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Holopainen_et_al.pdf.
- Holopainen, M., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu 5. Viitattu 2.9.2020 https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42935/Laserkirja_painettu.pdf?sequence=2.
- Holopainen, M. 2019. Metsien kaukokartoitus - digitalisaatiota, täsmämetsätaloutta ja 4D-geoinformatiikkaa. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2019 artikkeli id 10214. Viitattu 10.2.2021 <https://doi.org/10.14214/ma.10214>.
- Holopainen, M., Tuominen, S., Karjalainen, M., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Vastaranta, M., Hujala, T. & Tokola, T. 2009. Korkearesoluutioisten E-SAR-tutkavien tarkkuus puustotunnusten koealatasen estimoinnissa. Metsätieteen aikakauskirja 4/2009: 309–323. Viitattu 14.12.2020 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6333.pdf>.

Hokkanen, J. 2015. UAV-kopterin pistepilven tarkkuus. Metropolia ammattikorkeakoulu. Maanmittaustekniikka. Insinööriyö. Viitattu 15.9.2020 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93543/Hokkanen_Jeremia.pdf?sequence=1.

Hovi, A. & Korpela, I. 2014. Aaltomuoto–avain laserkeilainhavaintojen syväliempään ymmärrykseen. Metsätieteen aikakauskirja 4/2014 247-252 Viitattu 13.1.2021 <https://www.metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article5886.pdf>.

Ikäheimo, J. 2015. Trestiman mediaanipuun mittaustarkkuuden testaus. Hämeen ammattikorkeakoulu. Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö. Metsätalouden koulutusohjelma. Viitattu 14.1.2021 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/89226/Ikaheimo_Juho.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Junttila, S. 2019. Utilizing multispectral lidar in the detection of declined trees. Academic dissertation. Department of Forest Sciences Faculty of Agriculture and Forestry University of Helsinki. Väitöskirja. Viitattu 13.11.2020 <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301795/Utilizin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Juurinen, A. 2018. Trestiman käyttökelpoisuus ensiharvennetuissa metsissä. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto. Metsätieteen kandidaatintutkielma. Viitattu 14.1.2021 https://www.researchgate.net/publication/331036054_TRESTIMA_FOREST_MEASUREMENT_SYSTEM_ITS_ACCURACY_AND_PRECISION_IN_FOREST_WORK_-_TRESTIMA_-METSANMITTAUSJARJESTELMAN_MITTAUSTARKKUUS.

Järviluoma, E. 2018. Puuston laatutietojen mittaus hakkuukoneen lähiympäristöstä. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Diplomityö. 67 s.

Kallioinen, V. & Laaksonen, L. 2016. Metsän UAV-ilmakuvaus. Toteutus ja pintamallien luominen. Hämeen ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Viitattu 20.2.2020 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106910/Metsan%20UAV-ilmakuvaus%20-%20Toteutus%20ja%20pintamallien%20laatiminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

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. Helsinki. Viitattu 14.3.2021 <https://mmm.fi/documents/1410837/14042305/Kaukokartoitukseen+perustuvan+mets%C3%A4varatiedon+hy%C3%B6tyanalyysi+MetKu+hankkeen+loppuraportti.pdf/e7f06309-9d99-6a81-be47-aab5e5125ea0/Kaukokartoitukseen+perustuvan+mets%C3%A4varatiedon+hy%C3%B6tyanalyysi+MetKu+hankkeen+loppuraportti.pdf>.

Kangas, A., Balázs, A., Haakana, H., Haakana, M., Henttonen, H., Heikkinen, J., Ihalainen, A., Katila, M., Korhonen, K., Kuronen, M., Myllymäki, M., Mäki-sara, K., Pitkänen, T., Peräsaari, J., Rätty, M. & Tuominen, S. 2020. Loppuraportti VMI I Tehostaminen. Maa- ja Metsätalousministeriö. Viitattu 17.3.2021 https://mmm.fi/documents/1410837/14042305/Loppuraportti+VMI+I+Final_joulu.pdf/220e44ad-ac4e-13a0-e2cc-e1dec492168a/Loppuraportti+VMI+I+Final_joulu.pdf.

Karten Space. 2020. Karten Space Nanosatellites. Viitattu 24.10.2020 <https://kartenspace.com/nanosatellites/>.

Kartta.nyt 2021. Kartta.nyt 2.0 Open apuna geomediamailmassa. Viitattu 10.2.2021 <https://blog.edu.turku.fi/karttanyt/kartat/paikkatieto/kaukokartoitus/>.

Kilpiäinen, S. 2021. SMK:n inventointiprosessi ja -menetelmä. Suomen metsäkeskus. Inventoinnin koealamittausten orientoiva Teams-koulutus, 8.4.2021.

Kukkonen, M. 2020. Single sensor airborne data sources for forest inventories by tree species, *Dissertationes Forestales* 297. 44 s. Viitattu 10.3.2021 <https://dissertationesforestales.fi/pdf/article10390.pdf>.

Koivuniemi, J. 2003. Metsiköihin ja paikannettuihin koealoihin perustuvan kuviointaisen arvioinnin tarkkuus. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 36. Väitöskirja. Viitattu 10.10.2020 <https://core.ac.uk/download/pdf/14916169.pdf>.

Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Viiri, H., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., Mäkelä, H., Nevalainen, S. & Pitkänen, J. 2013. Suomen metsät 2004–2008 ja niiden kehitys 1921–2008. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2013:269-608. Viitattu 10.3.2021 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article6025.pdf>.

Korhonen, K. & Kangas, A. 2021. Valtakunnan metsien inventointi (VMI) juhlii satavuotiasta taivaltaan vuonna 2021. Luonnonvarakeskus Luke. Viitattu 25.3.2021 <https://www.luke.fi/uutinen/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi-juhlii-satavuotista-taivaltaan-vuonna-2021/>.

Korhonen, K. & Rätty, M. 2021. Metsävarat. Luonnonvarakeskus Luke. Viitattu 13.3.2021 <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsavarat-ja-metsasuunnittelu/metsavarat/>.

Korpela, I. & Välimäki, E. 2007. Metsän kartoitus yhdistämällä fotogrammetria ja maastogeodesia. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2007, 403-405. Viitattu 10.2.2020 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article5988.pdf>.

Kuusela, K. 1960. Volume and increment calculation of a sample plot determined with the relascope. *Suomalaisen Kirjallisuuden Kirjapaino*. Helsinki. Viitattu 10.10.2020 <https://www.silvafennica.fi/pdf/article7115.pdf>.

Kouva, V. 2017. Ilmalaserkeilainten kehitys. Lapin AMK. Tekniikka ja liikenne. Maanmittaustekniikka. Opinnäytetyö. Viitattu 12.1.2020 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/138649/Ville_Kouva.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Laaksonen, H. 2019. Laserkeilausaineistoja ja ilmakuvia päivitetään jatkossa tiheämmin. Maanmittauslaitos. Viitattu 10.1.2021 <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/laserkeilausaineistoja-ja-ilmakuvia-paivitetaan-jatkossa-tiheammin>.

Laatumetsä 2018. Laatumetsä Sovelluksen käyttäjäohje. Wuudis Solutions Oy Mikkeli. Viitattu 20.9.2020 https://www.wuudis.com/wp-content/uploads/2020/04/Laatumetsa_kayttajaohje_3.0.pdf.

Luke 2010. Valtakunnan metsien inventointi. Luonnonvarakeskus. Viitattu 15.1.2021 <http://www.metla.fi/ohjelma/vmi/vmi-historia.htm>.

Lohilahti, I., Hannus, E., Mykkänen, A. & Tuominen, R. 2019. Kaukokartoitus ympäristön monitoroinnissa. Teoksessa: H. Soininen, N. Haatanen & L. Pulkkinen (toim.) Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä Vuosijulkaisu 2019. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Viitattu 27.12.2020 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/267675/URNISBN978-952-344-226-9.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Maltamo, M., Packalen, P., Uuttera, E., Ärölä, E. & Heikkilä, J. 2008. Laserkeilaus hyödyntäminen metsäsuunnittelun tietolähteenä. Metsätieteen aikakauskirja 4/2008. Viitattu 20.2.2021 <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff08/ff084304.pdf>.

Mangold, K., Shaw, J.A. & Vollmer, M. 2013. The physics of near-infrared photography. *European Journal of Physics* 34: 51-71. Viitattu 10.10.2020 <https://www.montana.edu/jshaw/documents/NIR%20Photography%20-%20Mangold%20et%20al%20-%20EJP2013.pdf>.

Matikainen, L., Pandzic, M., Li, F., Karila, K., Hyyppä, J., Litkey, P., Kukko, A., Lehtomäki, M., Karjalainen, M. & Puttonen, E. 2019. Toward utilizing multitemporal airborne laser scanning, Sentinel-2, and mobile laser scanning in map updating. *Journal of Applied Remote Sensing*. Viitattu 29.1.2020 [linkki https://helda.helsinki.fi/handle/10138/306057](https://helda.helsinki.fi/handle/10138/306057).

Melander, L. 2019. Time-of-flight imaging -tekniikka (Kinect-kamera). Teoksessa H. Ovaskainen (toim.) Kohti automaattista puunkorjuun laadunvarmistamista. Metsätehon raportti 251. Vantaa: Metsäteho Oy, 8-12. Viitattu 20.3.2021 https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkorjuun_laadun_mittaamista.pdf.

Melkas, T., Riekkö, K. & Sorsa, J.-A. 2018. Automaattinen toimenpidekuvion rajojen muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tuloskalvosarja 7a/2018. Viitattu 15.1.2021 <http://www.metsateho.fi/automaattinen-toimenpidekuvion-rajojen-muodostus-hakkuukoneen-sijaintitietoon-perustuen/>.

Moilanen, J. 2015. Relasphone-sovelluksen käyttäjäkokemuksia metsäsuunnittelussa. Karelia-ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Viitattu 13.9.2020 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94921/opinnaytetyo_valmis_jm.pdf?sequence=1.

Moilanen, J. 2017. Lähi-infrapunakameralla varustetun miehittämättömän kuvauskopterin käyttömahdollisuudet taimikon hoitotarpeen arvioinnissa. Kareliammattikorkeakoulu Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Viitattu 1.1.2021 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134297/Moila-nen_Jaakko.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Niemi, M., Mäkinen, A., Viitala, R. & Lumperoinen, M. 2020. Metsäsuunnittelun laskennan perusteet–arvoja yhteensovittamassa. Tapio. Viitattu 10.1.2021 <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/08/Mets%C3%A4suunnittelun-lasken-nan-periaatteet.pdf>.

Ovaskainen, H. 2019a. Kohti automaattista puunkorjuun laadunvarmistamista. Metsätehon raportti 251. Vantaa: Metsäteho Oy. Viitattu 20.3.2021 https://metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkor-juun_laadun_mittaamista.pdf.

Ovaskainen, H. 2019b. Laatutunnusten mittaaminen eri teknologioiden avulla ja automaattisen laadunhallinnan tavoitella. Teoksessa H. Ovaskainen (toim.) Kohti automaattista puunkorjuun laadunvarmistamista. Metsätehon raportti 251. Vantaa: Metsäteho Oy, 49-51. Viitattu 20.3.2021 https://metsateho.fi/wp-con-tent/uploads/Raportti_251_Kohti_automattista_puunkorjuun_laadun_mittaa-mista.pdf.

Packalen, P., Kotivuori, E., Kukkonen, M., Korhonen, L., Maltamo, M. & Heikkilä, J. 2019. Tiheäpulsinen ja monikanavainen laserkeilausaineisto puulajeit-taisessa inventoinnissa. Metsätieto ja sähköiset palvelut -hankkeen lopputulos-seminaari 22.1.2019. Helsinki. Viitattu 1.2.2021 <https://mmm.fi/docu-ments/1410837/11872529/Tihe%C3%A4pulssinen+ja+monikanavainen+laser-keilausaineisto+puulajittaisessa+inventoinnissa.pdf/34ca7603-fbf4-99f0-386d-51bdc6d1ee77/Tihe%C3%A4pulssinen+ja+monikanavainen+laserkeilausai-neisto+puulajittaisessa+inventoinnissa.pdf>.

Packalen, P., Maltamo, M., Rätty, J., Kukkonen, M., Kotivuori, E. & Korhonen, L. 2019. Laserkeilausinventoinnin kehittäminen Suomen metsäkeskukselle osana Puu liikkeelle ja uusia tuotteita metsästä (2016-2018) –kärkihanketta Itä-Suo-men yliopisto. Metsätieteiden osasto. Viitattu 10.2.2021 <http://docplayer.fi/166570437-Laserkeilausinventoinnin-kehittaminen-suomen-metsakeskukselle-osana-puu-liikkeelle-ja-uusia-tuotteita-metsasta-karkihan-ketta.html>.

Peltoniemi, N., 2019. Leimikon puustovaurioasteen määrittäminen ajouralle näkyvien runkovaurioiden perusteella. Metsätieteen pro gradu -työ. Itä-Suomen yliopisto. Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. 64 s. Viitattu 2.1.2021 linkki.

Piri, T., Selander, A., Hantula, J. & Kuitunen, P. 2019. Juurikäpätuhojen tunnistaminen ja torjunta. Suomen metsäkeskus. Viitattu 10.1.2021 <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/juurikaapatuhojen-tun-nistaminen-ja-torjunta.pdf>.

Pitkänen, T. P. 2019. Näkeeko laser metsän puilta? Luonnonvarakeskus Luke. Blogiartikkeli. Viitattu 1.10.2020 <https://www.luke.fi/blogi/nakeeko-laser-metsan-puilta/>.

Piwowar, J. M. 2011. NOAA Satellites. Viitattu 10.1.2020 <http://uregina.ca/piwowarj/Satellites/NOAA.html>.

Pulkkinen, S. 2020. Kirjanpainajatuhojen kartoitus multispektrikameralla. Karelia ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutus. Opinnäytetyö. Viitattu 10.2.2021 <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/306456/Kirjanpainajatuhojen%20kartoitus%20multispektrikameralla%20SP.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Raitila, J., Ahola, J., Virkkunen, M., Sipola, T., Riihimäki, H. & Tenhunen, J. 2021. Digitaaliset metsänarviointimenetelmät puuhuollon tehostajina. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oyj. Tutkimusraportti VTT-R-00010-21. 67s.

Raitio, P. 2017. Puulajien spektrien vertailu ja hyödyntämismahdollisuudet kaukokartoituksessa. Aalto-yliopisto. Diplomityö. Viitattu 1.2.2021 https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/26789/master_Raitio_Pekka_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rasinmäki, J. & Känkänen, R. 2014. Kuntien hiilitasekartoitus osa 1. Helsingin, Lahden, Turun, Vantaan ja Espoon maankäyttösektorin kasvihuonepäästöt, hiilinielut ja hiilivarastot. Helsingin kaupunki, Ympäristökeskus. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 9/2014. Viitattu 12.10.2020 https://ilmastotyokalut.fi/files/2014/06/hiilitase_osa-1_julkaisu_ymk_2014.pdf.

Relasphone 2014. VTT Technical Research Centre of Finland. Viitattu 10.10.2020 <http://www.relasphone.com/indeksi.html>.

Rieki, K., Melkas, T., Ovaskainen, H., Poikela, A. & Sorsa, J.-A. 2019. Ajourien automaattinen tuottaminen ja ajouratunnusten määrittäminen hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 4/2019. Viitattu 15.1.2021 <http://www.metsateho.fi/ajourien-automattinen-tuottaminen/>.

Ruokamo, H. 2019. Time-gating technique for a single-photon detection-based solid-state time-of-flight 3D range imager. Doctoral Thesis. University of Oulu. Viitattu 3.2.2021 <http://urn.fi/urn:isbn:9789526224756>.

Ruuhijärvi, R. 2009. Sata vuotta metsätyyppejä. Metsätieteen aikakauskirja 2/2009, 159-161 Viitattu 10.11.2020 <https://metsatieteenaikakauskirja.fi/pdf/article5767.pdf>.

Räty, J. 2020a. Fusing diameter distributions predicted by area-based and tree-level approaches in coniferous dominated forests. Viitattu 13.3.2021 <https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/7904/15785576481117749264.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Räty, J. 2020b. Prediction of diameter distributions in boreal forests using remotely sensed data. Viitattu 13.3.2021 <https://dissertationesforestales.fi/article/10364>.

Räty, J., Packalen P. & Maltamo M. 2018. Comparing nearest neighbor configurations in the prediction of species-specific diameter distributions. *Annals of Forest Science* 75(26): 1-16. Viitattu 12.2.2021 <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0711-0>.

Räty, J., Packalen, P. & Maltamo, M. 2019a. Nearest neighbor imputation of logwood volumes using bi-temporal ALS, multispectral ALS and aerial images. *Scandinavian Journal of Forest Research* 34(6):469-483 Viitattu 12.2.2021 <https://erepo.uef.fi/bitstream/handle/123456789/7865/1576070363686006501.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.

Räty, J., Packalen, P. & Maltamo, M. 2019b. Fusing diameter distributions predicted by an area-based approach and individual tree-detection in coniferous-dominated forests. *Canadian Journal of Forest Research* 50(2):113-125. Viitattu 12.2.2021 <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13595-018-0711-0.pdf>.

Siegel, E. 2016. Mostly Mute Monday: New map of the milky Milky Way now complete! Medium. Viitattu 2.1.2021 <https://medium.com/starts-with-a-bang/mostly-mute-monday-new-map-of-the-milky-way-now-complete-da6c5ee4bd16>.

Suomen metsäkeskus 2021a. Metsitystuki. Tuki joutoalueiden metsitykseen. Suomen metsäkeskus. Viitattu 10.4.2021 <https://www.metsakeskus.fi/fi/metsatalouden-tuet/metsitystuki>.

Suomen metsäkeskus 2021b. Avoin metsä- ja luontotieto. Suomen metsäkeskus. Viitattu 20.3.2021 <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto>.

Tokola, T., Hyppänen, H., Miina, S., Vesa, L. & Anttila, P. 1998. Metsän kaukokartoitus. *Silva Carelica* 32. 156 s. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. Saarijärvi: Gummerrus Kirjapaino.

Tiihonen, S. 2014. Windows Phone 8 Jokamies metsänmittaussovellus. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Ohjelmistotekniikan koulutusohjelma. Tekniikan ja liikenteen ala. Opinnäytetyö. Viitattu 24.12.2020 https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76832/samppa_tiihonen_oppari.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Trestima 2018. Trestima Maastotallennin käyttöohje v1.2. Viitattu 12.11.2020 https://www.trestima.com/w/wp-content/uploads/2018/06/TREST-TIMA_ka%CC%88ytto%CC%88ohje_fi_v1.2.pdf.

Trestima 2020. Trestima Metsänmittausjärjestelmä. Trestima Oy. Tampere. Viitattu 12.11.2020 <https://www.trestima.com/w/metsanmittausjarjestelma/>.

Törmä, M. 2018. Paikkatiedon keruu ja muokkaus: kaukokartoitus. Aalto-yliopisto. Viitattu 15.1.2021 <https://slideplayer.fi/slide/2892918/>.

Viljanen, N. 2017. Ympäristön 3D fotogrammetriset hyperspektri- ja RGB-mittaukset keveillä kauko-ohjattavilla ilma-alusjärjestelmillä. Aalto-yliopisto, Rakennetun ympäristön laitos, Insinööritieteiden korkeakoulu. Diplomityö. Viitattu 10.1.2021 https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/24744/master_Viljanen_Niko_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Välimäki, E. & Antinluoma, J. 2021. Kasvunlaskennan muutokset metsävaratiedossa ja niiden vaikutukset toimenpiteiden laskentaan. Suomen metsäkeskus. Teams-koulutus 18.3.2021.