



KUOPUS-hankkeen (kuolleen puun seurantamenetelmän kehittäminen) loppuraportti (1.1.2023–30.11.2024)

Jussi Lappalainen, Suomen metsäkeskus

Vesa Leppänen, Arbonaut

Miia Saarimaa, Suomen metsäkeskus

arbonaut



Euroopan unionin rahoittama
NextGenerationEU



Maa- ja metsätalousministeriö

Nappaa
hiilestä
visma sign
kiinni
www.vismasign.com
MAANKÄYTTÖSEKTORIN
ILMASTORATKAISUT

Electronically signed / Sähköisesti allekirjoitettu / Elektroniskt signat / Elektronisk signatur / Elektronisk signatur
<https://sign.visma.net/fi/document-check/529cf8b2-19d2-4a8f-b9d8-00798369c9db>

1 Hankkeen tavoitteet

Suomen metsäkeskuksen tuottaman kaukokartoitusperusteisen metsien inventoinnin rinnalla voisi olla mahdollista tuottaa kattavaa tietoa kuolleen pystypuun määrästä. Kuolleen puun inventointi olisi hyvä ja tärkeä lisä jo olemassa olevaan metsävaratietoon. Kuollutta pystypuuta voidaan tulkita jo olemassa olevan 5pt/m² keilausaineiston ja väärävari-ilmakuvan avulla. Kuollutta maapuuta on arvioitu monikanavaiselta keilausdataalta Ruotsin olosuhteissa ja menetelmäkehitystä tämän osalta tulisi tehdä Suomessa.

KUOPUS- eli kuolleen puun seurantamenetelmän kehittäminen -hankkeen tavoitteena on testata Arbonaut Oy:ssä kuolleen pystypuun tunnistamiseen kehitettyä laserkeilausaineiston automaattiseen tulkintaan perustuvaa menetelmää. Hankkeen aikana testataan kuolleen puun arviointia varten kehitetyn laserkeilausaineiston automaattiseen tulkintaan perustuvan menetelmän toimivuutta tiheäpulsilaserkeilatuilla alueilla eri puolilla Suomea sijaitsevilla testialueilla. Testauksen keskeisenä tavoitteena on saada luotettava kuva kuolleen puun arvioinnin tarkkuudesta ja mahdollisista virhelähteistä.

Toisena tavoitteena on testata Arbonaut Oy:n Ruotsin olosuhteissa kehittämää maapuun tunnistamista käyttäen tiheää monikanavaista laserkeilausaineistoa. Lopputuloksena tästä testauksesta saamme tietoa kuolleen maassa olevan lahopuun estimointitarkkuudesta erilaisissa metsiköissä ja siitä, voidaanko menetelmä ottaa käyttöön tulevaisuudessa Metsäkeskuksen tuotantokeilauksissa.

2 Opetusaineiston hankinta

Hanketta varten hankittiin opetusaineisto Oulun ja Heinäveden inventointialueilta. Metsäkeskus palkkasi määräaikaista harjoittelijoita mittaamaan puukarttakoealoja, joilta mitattiin myös kuolleen puun tunnuksia hankkeen mallinnusta varten. Mittaukset tehtiin kesällä 2023. Väliraportin liitteenä on tarkempi kuvaus KUOPUS-hankkeen maastomittauksista (Liite 3.).

3 Laserkeilausaineiston hankinta

Hanketta varten hankittiin laserkeilausaineistoa kahdesta kohteesta, Oulusta ja Heinävedeltä. Metsäkeskus laati tarjouspyynnön ja kilpailutti monikanavaisen laserkeilausaineiston hankinnan vuoden 2024 alussa. Metsäkeskus sai vain yhden tarjouksen ja se johti lopulta aineiston hankintasopimuksen tekemiseen tarjoajan kanssa. Valittu tarjoaja oli puolalainen Opegieka, joka on tehnyt vastaavanlaista aineiston keruuta muissakin projekteissa.

Laserkeilaus suoritettiin kesällä 2023. Aineiston toimitus viivästyi jonkin verran ja laadunvalvonnassa löydettiin joitakin laatuongelmia mm. vihreän kanavan peittävyyydessä. Aineisto

jouduttiin tästä syystä käymään läpi erittäin huolellisesti laaduntarkastuksen yhteydessä. Aineisto voitiin lopulta hyväksyä uusintatoimituksen jälkeen projektin käyttöön, koska projektin analyysit pystytään aineistolla toteuttamaan. Kuitenkin näyttää siltä, että kanavien 1 ja 3 intensiteetissä on keilausalueen sisällä vaihtelua, joka korreloi näiden kanavien kesken, kun taas kanavan 2 intensiteetti on vakaa yli koko keilausalueen.

Jatkoa varten selvitimme edelleen mistä ongelma johtui, jotta asia voitaisiin tulevaisuudessa projekteissa välttää. Asiaan löytyikin selvyyttä, virhe johtui laskentavirheestä keilausaineiston toimittajan tuotantoprosessissa. LAS/LAZ tiedostostandardin versiot 1.1 – 1.4, jotka ovat yleisesti käytössä, eivät tue optimaalisesti monikanavakeilauksen tuottamaa aineistoa. Koska standardiformaatissa ei ole reflektanssille omaa kenttää, prosessoinnissa joudutaan valitsemaan, tallennetaanko datasta intensiteetti vai reflektanssiarvo. Tutkimusten mukaan reflektanssiarvo on puulajintulkinnassa ja kuolleiden puiden tunnistamisessa hyödyllisempi kuin intensiteetti. Jos reflektanssi tallennetaan intensiteetille varattuun tilaan tiedostiformaatissa, sen syvyyttä joudutaan vähentämään kentän salliman tilan takia. Jonkin verran käytetäänkin epästandardia menettelyä, jossa koko reflektanssiarvo tallennetaan ns. backbits-tilaan tiedostiformaatissa. TerraScan kykenee lukemaan reflektanssin backbits-kentästä mutta kaikki ohjelmistot eivät tue tätä tapaa. Aineistotoimitusta tutkittaessa toimittajan kanssa käydyissä palaverissa todettiin, että intensiteettikenttään oli laskettu kanavilla 1 ja 3 intensiteetti eikä reflektanssi, mikä johti arvon suurempaan vaihteluun. Virheen löytäminen otti aikaa ja tarvittiin jonkin verran salapoliisityötä. Toimittajalta muihin tehtäviin siirtyneen avainasiantuntijan lähtö vaikutti virheen syntyyn. Jatkoprojekteissa asia lienee korjattu, kun työohje on toimittajalla dokumentoitu entistä tarkemmin. Oulun alueella olevan maston takia pari keilauslinjaa jouduttiin lentämään korkeammalta kuin teknisessä spesifikaatiossa oli ohjeistettu. Tämä aiheutti jonkin verran hajontaa kanavien reflektanssiarvoihin. Vihreän laserin säteen hajaantuminen etäisyyden funktiona, (ns. beam divergence) aiheuttaa kyseisen kanavan intensiteettiä muuttumisen etäisyyden funktiona eri tavalla infrapunakanavien kanssa. Eri korkeuksilta lennetyssä aineistossa reflektanssista tai intensiteetistä laskettujen sävyarvojen suhteet vaihtelevat jonkin verran. Olisi parasta, aina kun mahdollista, lentää aina samalta korkeudelta maan pinnan yläpuolella tai pystyä käyttämään keilainta, jossa kaikkien kanavien säteiden beam divergence on suunnilleen samanlainen.

4 Tulokset

4.1 Työpaketti 1. Kuolleen pystypuun määrän ennustaminen

Kuolleen pystytuun tunnistamisen mallit tuotettiin hankkeessa Heinäveden ja Oulun alueille. Puukarttakoeala-aineistoa käytettiin mallin opettamiseen sekä testaamiseen. Mallin opetus tehtiin yksittäisen latvasegmentin tarkkuudella. Latvasegmentit tuotettiin kuvioimalla puuston pituusmallirasteria. Kunkin koeala-aineiston latvasegmentin luokka, elävä tai

kuollut, määritettiin latvasegmentin pisimmän puun mukaan: Pisimmän puun ollessa elävä myös luokka on elävä, ja kuolleen puun ollessa pisin luokka on kuollut.

Kuolleen pystypuun luokittelumallina käytettiin Random Forest -algoritmia. Mallin tarkkuuden testaaminen suoritettiin leave-one-out-ristiinvalidointimenetelmää käyttäen, jossa opetusaineisto jaetaan segmentteihin, esimerkiksi kymmeneen suurin piirtein yhtä suureen osaan. Kukin segmentti otetaan erilleen ja opetetaan malli käyttäen kaikkia muita segmenttejä, minkä jälkeen mallia testataan opetusaineiston segmenttiin, jota ei käytetty opetuksessa. Samalla tavoin malli opetetaan erikseen jokaiselle koeala-aineiston segmentille käyttäen kaikkia muita segmenttejä paitsi itseään mallin. Tällöin opetusaineiston koko yhdelle segmentille on $n-1$, jossa n on koeala-aineiston segmenttien lukumäärä.

Oulun mallin latvasegmenttien lukumäärä on 5843, joista kuolleita on 208 (taulukko 1). Heinäveden mallin latvasegmenttien lukumäärä on 2725, joista kuolleita on 236. Oulun aineistolla kuolleista pystypuista tunnistettiin monikanava-aineistolla 70,7 %. Tunnistustarkkuus, joka kertoo millä todennäköisyydellä löytynyt kuollut pystypuu on oikea opetusaineistoon verrattuna, oli 89,6%. Kun otetaan huomioon koko testiaineisto, puut luokiteltiin oikeaan luokkaan 98,7% todennäköisyydellä (taulukko 2). Heinäveden aineistolla kuolleista pystypuista tunnistettiin 77,1%. Tunnistustarkkuus Heinävedellä oli 91,9% ja koko testiaineistolla luokittelu osui oikeaan 97,4% puista (taulukko 3) Tulokset ovat hyviä, kun otetaan huomioon, että tiheissä metsissä on kuolleita pystypuita, jotka ovat niin tiheästi naapuripuiden latvuksen sisällä, jotta niiden havaitseminen ylhäältä päin on todella haastavaa. Pääsääntöisesti suurimmat kuolleet pystypuut ja ne, joilla on runsaasti oksastoa, tunnistetaan parhaiten.

Taulukko 1. Opetusaineiston koko Heinäveden ja Oulun alueille.

	Elävä	Kuollut	Yhteensä
Oulu	5635	208	5843
Heinävesi	2489	236	2725



Kuva 1. Kuolleita puita Heinävedellä maastossa vasemmalla ja tulkintatulokset (valkoiset kuviot) oikealla väärävärikuva taustalla. Maastokuva on kuvattu mustalla ympyröidyltä alueelta.

Heinäveden opetusaineistoa täydennettiin maastokäynnillä kerätyllä lisäaineistolla, jonka tarve tuli esiin puukarttakoeala-aineistolla tehtyjen tulosten maastotarkastuksessa kummallakin testialueella. Lisäaineisto täydensi puukarttakoeala-aineistoa hyvin ja maastossa koettu tulos parani oleellisesti. Lisäaineistoon poimittiin Heinäveden alueelta maastokäynnillä havaittua 115 elävää luokkaa edustavaa latvasegmenttiä, jotka olivat ensimmäisessä luokittelutuloksessa luokituneet väärin kuolleiksi. Lisäaineistolla täydennetyn mallin validointitulokset ovat esitettyinä taulukoissa 4 ja 5. Koska lisäaineisto oli poimittu vain Heinäveden alueelta, leave-one-out-validointi voitiin tehdä vain Heinäveden aineistoa käyttäen. Oulun tarkkuustulokset on saatu luokittelemalla koko Oulun koeala-aineisto Heinäveden mallia ja koeala-aineistoa käyttäen. Lopulliset luokittelutulokset kummallekin alueelle on siis tehty Heinäveden täydennettyä koeala-aineistoa sekä mallia käyttäen.

Oulu

		Maasto		
		Elävä	Kuollut	
Tulkittu	Elävä	5618	61	98.9%
	Kuollut	17	147	89.6%
		99.7%	70.7%	

Kokonaistarkkuus: 98.7%

Taulukko 2. Oulun kuolleiden puiden tunnistamistulos latvasegmenttitasolla ensimmäisellä luokittelukierroksella.

Heinävesi

		Maasto		
		Elävä	Kuollut	
Tulkittu	Elävä	2473	54	97.9%
	Kuollut	16	182	91.9%
		99.4%	77.1%	

Kokonaistarkkuus: 97.4%

Taulukko 3. Heinäveden kuolleiden puiden tunnistamistarkkuus koeala-aineiston latvasegmenttitasolla ensimmäisellä luokittelukierroksella.

Oulu – Heinäveden malli ja koealat

		Maasto		
		Elävä	Kuollut	
Tulkittu	Elävä	5631	98	98.3%
	Kuollut	4	110	96.5%
		99.9%	52.9%	

Kokonaistarkkuus: 98.3%

Taulukko 4. Oulun kuolleiden puiden tunnistamistarkkuus koeala-aineiston latvasegmenttitasolla. Koeala-aineiston tunnistaminen on tehty Heinäveden mallia käyttäen.

Heinävesi – lisätty poimittu opetusaineisto

		Maasto		
		Elävä	Kuollut	
Tulkittu	Elävä	2580	66	97.5%
	Kuollut	24	170	87.6%
		99.1%	72.0%	

Kokonaistarkkuus: 96.8%

Taulukko 5. Heinäveden kuolleiden puiden tunnistamistarkkuus koeala-aineiston latvasegmenttitasolla. Koeala-aineistoon on lisätty maastokäynnillä todennetut elävät puut.

4.2 Johtopäätökset ja suositukset työpaketista 1.

Ensimmäistä luokittelukierrosta seuranneiden maastokäyntien perusteella Heinäveden ja Oulun mallien todettiin ylikuokittelevan kuollutta puuta koko aluetta luokitellessa. Koealaineiston sisäisesti tehty tarkkuustarkastelu ei siis edustanut koko alueen todellista luokittelutarkkuutta. Heinäveden maastokäynnin pohjalta poimitut 115 latvasegmenttiä paransivat toisen luokittelukierroksen maastossa koettua tulosta merkittävästi, joskin koealatasen tarkkuuksissa tapahtui laskua. Tämän kokemuksen perusteella voidaan päätellä, ettei alkuperäinen koealaineisto edustanut riittävän hyvin kummankaan kohdealueen puuston eläviä puita. Opetusaineiston suurempi hajonta paransi maastossa koettua luokittelutulosta mutta suuremman hajonnan aineistossa mallin sisäisesti raportoitu tarkkuus jää matalammaksi.

Erityisesti rämemäisillä kasvupaikoilla kasvavia mäntyjä puuttui puukarttakoealojen aineistosta, johtaen tämänkaltaisten elävien mäntyjen säännönmukaiseen luokittumiseen kuolleiksi puiksi ensimmäisellä luokittelukierroksella. Elävät rämemännyn muistuttavat suhteellisen vähäisen vihreän kasvimateriaalinsa vuoksi enemmän kuivien kohteen kuolleita puita kuin muita eläviä puita. Ensimmäisen luokittelukierroksen maastotarkastelussa havaittiin myös selvää kuolleen puun ylikuokittelua koivuvaltaisilla kuvioilla, joilla koivun seassa kasvaa kuusta. Poimitut 115 lisälatvasegmenttiä koostuivat pääosin näiden kahden kohdetyypin puista.

Näiden KUOPUS-hankkeen kokemusten perusteella puukarttakoealojen otantaperusteita tulisi muokata edustavan otoksen varmistamiseksi, jos tavoitteena on luokitella kuolleita pystypuita. Vaihtoehtoina kuolleen puun tulkinnan luotettavuuden varmistamiseksi olisi lisätä vähintään 1–2 koealaa rämeille sekä vähintään sama määrä koivuvaltaisille kuvioille, joilla on koivun lisäksi kuusta. Toisena vaihtoehtona olisi tehdä jälkikäteen lisäotanta, jos maastomittauksia tarkasteltaessa todetaan, että aineistosta puuttuu tiettyntyyppisiä eläviä puita, joiden puuttuminen heikentää mallin toimivuutta. Lisäotantaa voidaan käyttää aina, jos maastossa koettu tarkkuus jää liian alhaiseksi.

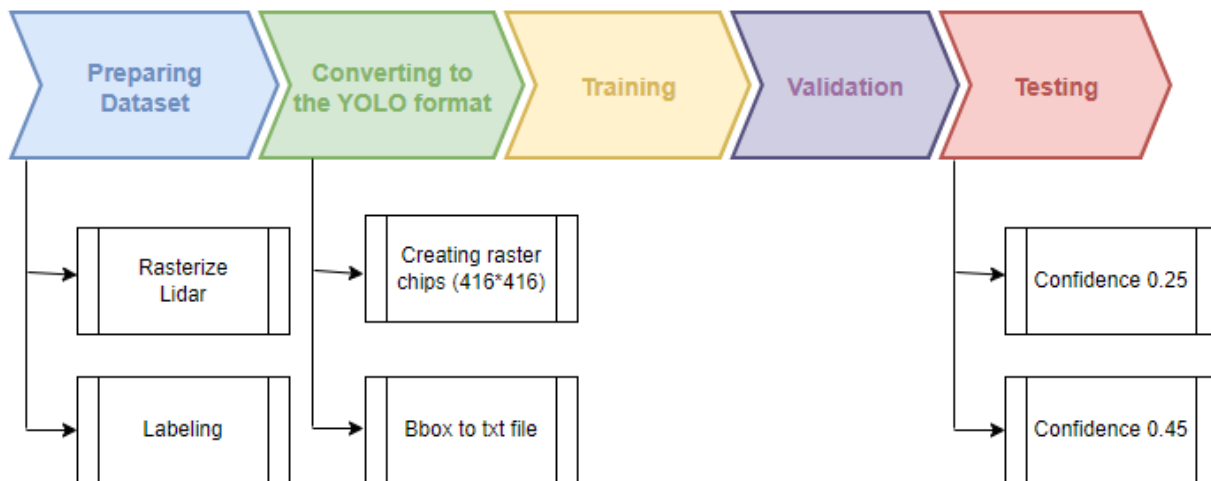
Hankkeen tulosten pohjalta voidaan alustavasti hahmotella luotettavan kuolleen puun luokittelun vaatimaa koealojen ja -puiden tarkka laatu ja määrä, joskin tarkempi määrä täsmentyy lisäprojektien kuluessa. On mahdollista, että hankkeen kohdealueiden ulkopuolella luokittelulle haasteita aiheuttavat elävät puut poikkeavat nyt havaituista laadultaan tai tyyppiltään. Opetusaineiston kuolleiden puiden monimuotoisuuden merkitys mallin toiminnalle jää hankkeen kokemusten perusteella vielä tuntemattomaksi.

Koska mallissa käytetään opetusaineistoa, jota ei ole poimittu harhattoman otannan periaatteiden mukaisesti, ei tuloksesta voida laskea harhatonta estimaattia kuolleiden pystypuiden absoluuttiselle lukumäärälle ilman harhattoman aineiston avulla tapahtuvaa harhakorjausta. Tulosaaineisto sopii kuitenkin hyvin runsaasti kuollutta pystypuuta sisältävien

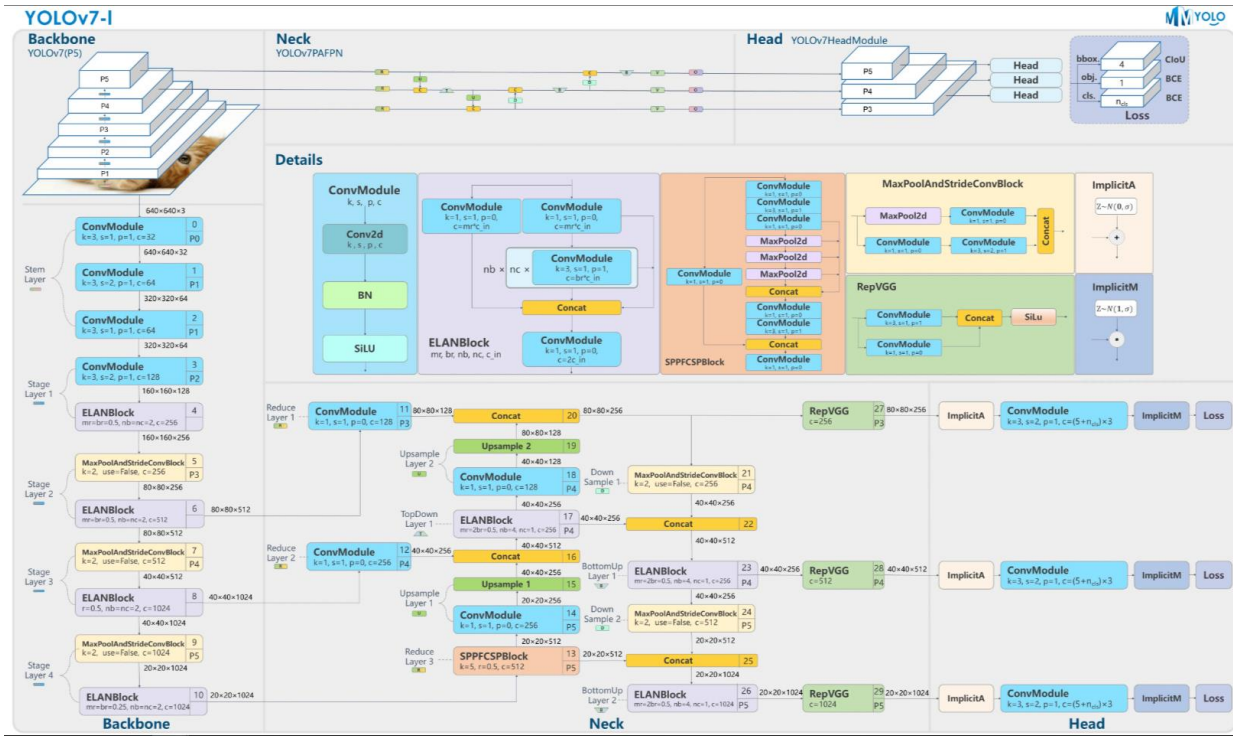
kohteiden löytämiseen ja toisaalta sellaisten kohteiden tunnistamiseen, jossa kuollutta pys-
typuuta on vain vähän.

4.3 Työpaketti 2. Monikanavakeilainaineiston testaaminen maassa olevan kuolleen puun mittaamisessa

Kuolleen maapuun tunnistamisessa kokeiltiin eri AI malleja. Parhaimmaksi valikoitui YOLOv7 -koneäkömalli, joka on tekoälytekniikka hahmontunnistukseen. Mallin arkkiteh-
tuuri on esitetty Kuvassa 3.1. Kuva 2. esittää mallin muodostamisprosessin. Kuva 3.1 esittää
eri mallien oppimistuloksia. Malli muodostettiin Heinäveden aineistolta tehdyllä opetusai-
neistolla ja sitä sovellettiin sekä Heinäveden aineistoon että Oulun aineistoon. Oulun tun-
nistamistulokset antavat hyvän kuvan mallin toimivuudesta opetusaineiston ulkopuolella.



Kuva 2. YOLOv7 koneäkömallin opetusprosessi.



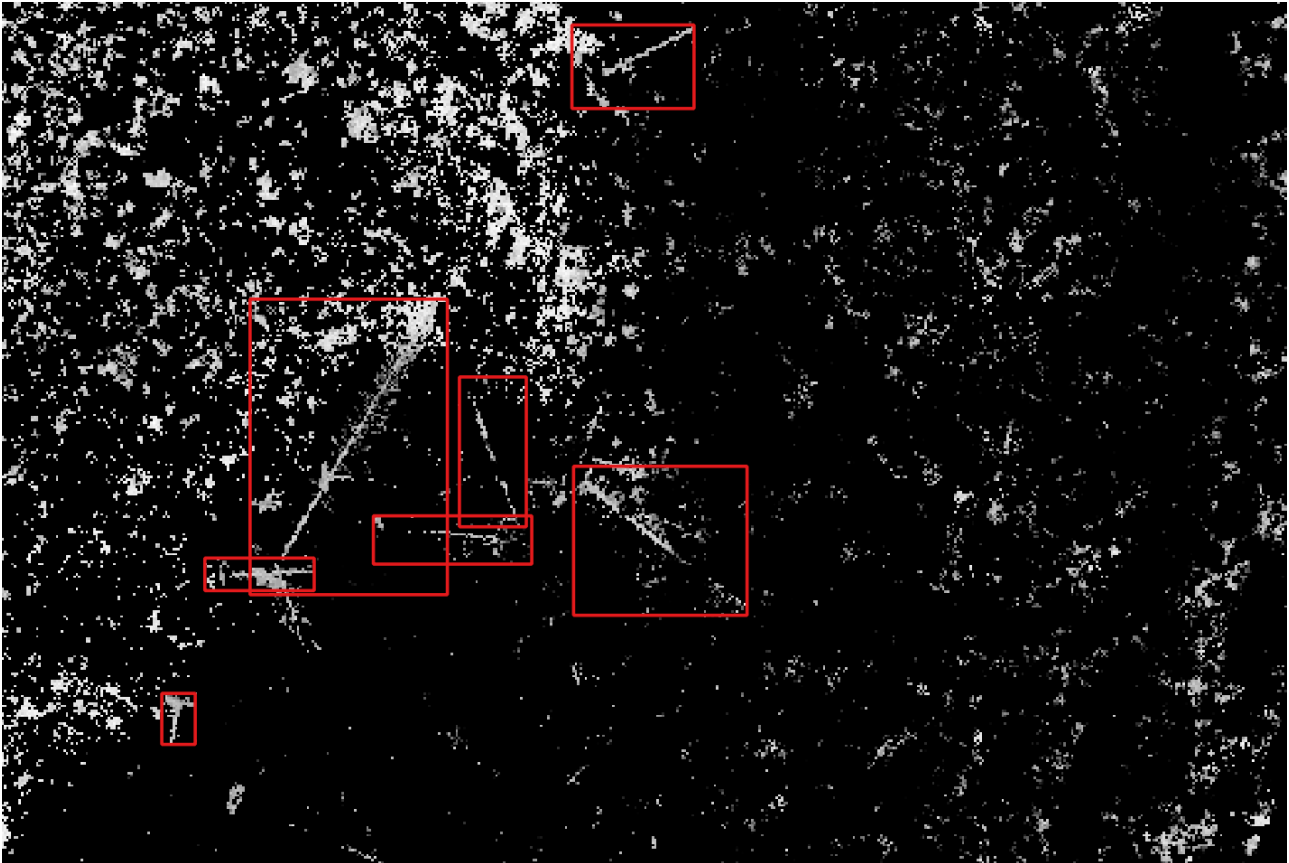
Kuva 2.1. YOLOv7 mallin arkkitehtuuri.

Aineiston valmisteluvaiheessa "Preparing Dataset" keilausaineistoa on käsitelty tuottamalla siitä rasteri maan pinnan lähellä olevista pisteistä. Pikselit, joissa on pisteitä, saavat rasterissa valkoisen värin ja pisteettömät jäävät mustiksi. Rasteri voidaan tuottaa eri resoluutioilla, tässä käytettiin 20 cm resoluutiota. Tässä tasossa kuolleet maapuut näkyvät ihmisilmälle tunnistettavasti, kun niiden osia on riittävästi maan pinnan yläpuolella. Aivan maan pinnan lähellä olevat pisteet joudutaan jättämään pois, koska maan pinnassa olevat lineaariset piirteet, kuten ajourat ja ojat tuottaisivat muutoin liikaa havaintoja. Tuotettua rasteria kutsutaan piirreaineistoksi Piirrerasteria näkyy kuvien 3 ja 4 taustakarttana.

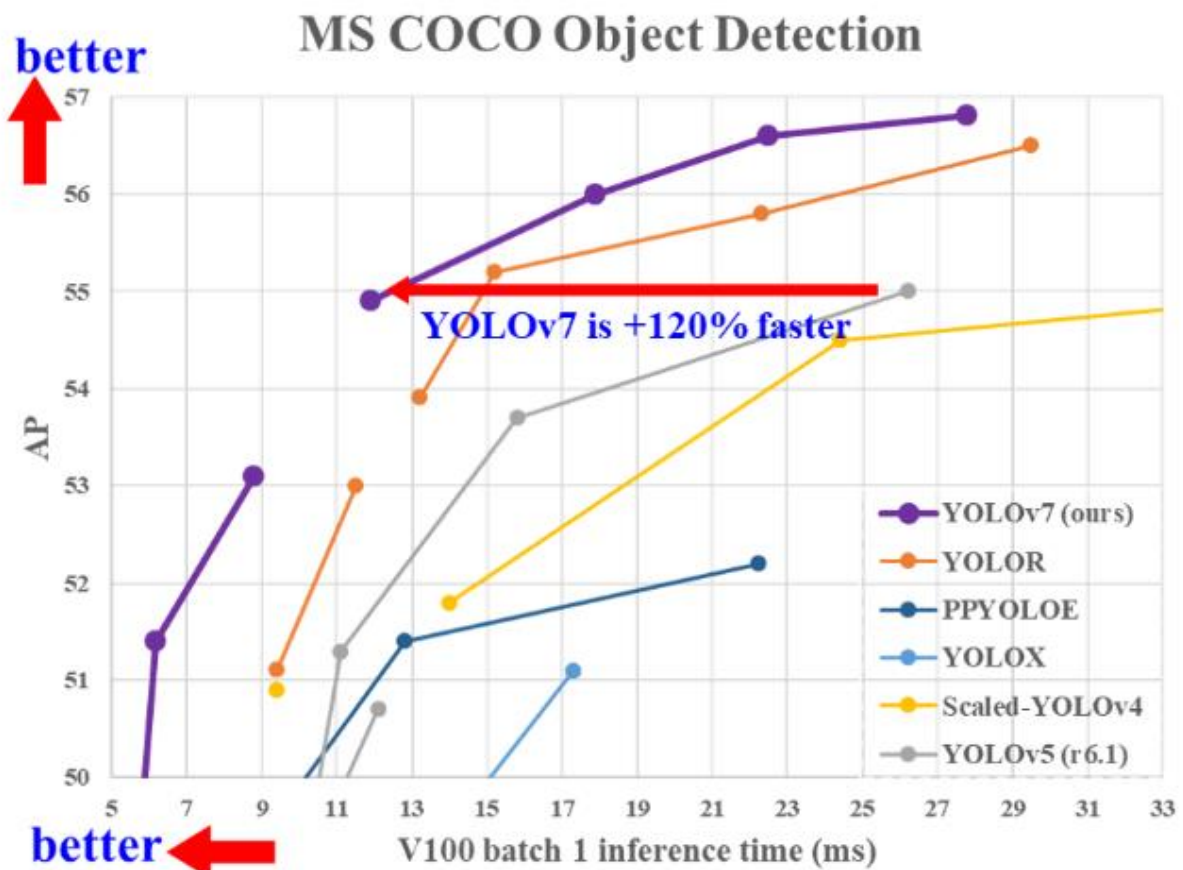
Labelointi "Labeling" on tekoälyn opetusaineiston tuottamisvaihe, jossa mallille osoitetaan piirreaineistolta tunnistettavia kohteita rajaamalla kuolleen maapuun tiukasti sisältäviä suorakaiteen muotoisia alueita. Koska kyseessä oli tunnistamistehtävä eikä luokittelu, opetettiin vain piirreaineistolta tunnistettavia puuyksilöitä. Opetuspuita labeloitiin joitakin tuhansia. Kuvassa 3. näkyy punaisilla suorakaiteilla osoitettuja labelöityjä opetusyksilöitä.

Tuotetut aineistot käännetään YOLOv7 mallin käyttämään formaattiin.

Mallin opetusvaihe on automaattinen mutta voi kestää laajojen aineistojen käsittelyssä kauan ja vaatia suurteholaskentaa. Opetuksen eteneminen on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3. LiDAR piirre-tasolla näkyviä maapuita ja niistä labelöityjä opetuspuita.

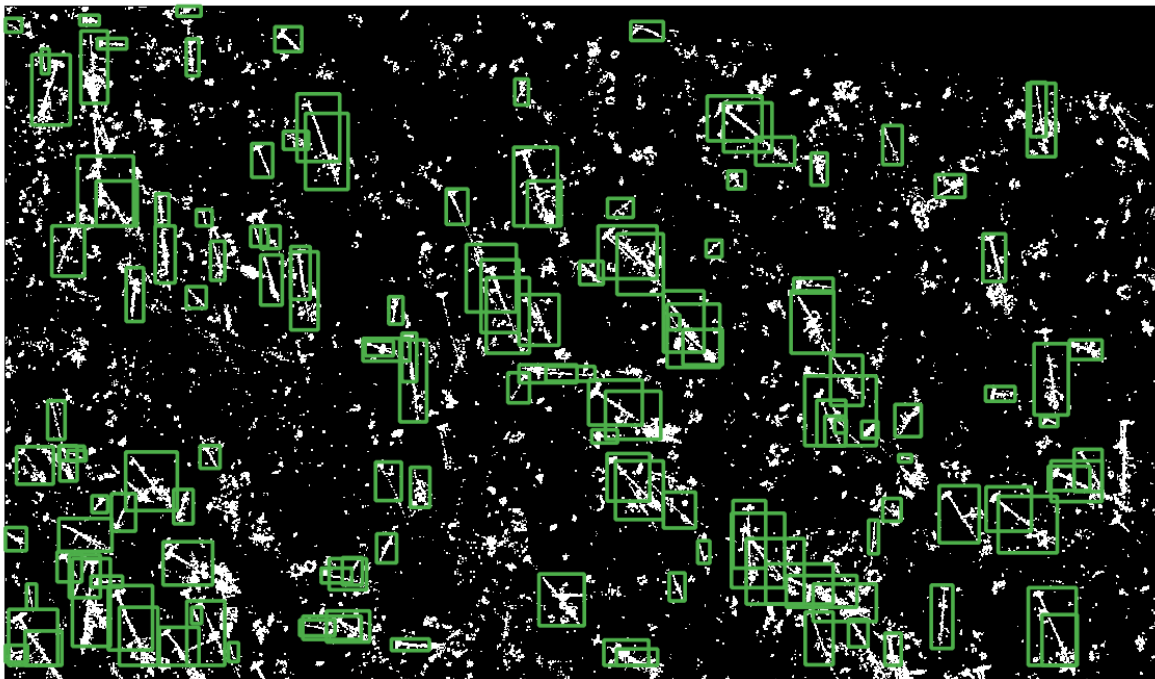


Kuva 3.1. Opetuksen eteneminen eri tunnistusalgoritmeilla. YOLOv7 pärjasi tässä aineistossa parhaiten.

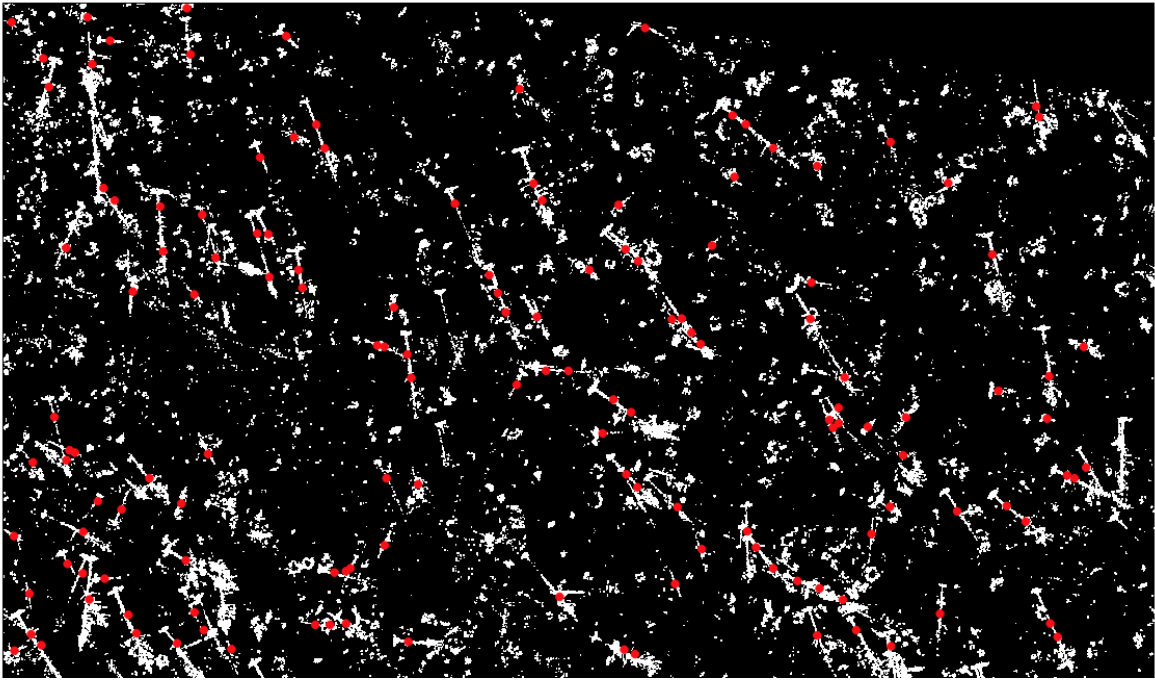
Validointivaiheessa testattiin algoritmin kykyä oppia tunnistamaan puut opetusaineistosta poimitulla testiaineistolla, josta tuotettiin raportoidut tarkkuustulokset (Kuva 7). Validointi tuloksia käsitellään tarkemmin alempana.

Tunnistetuista kohteista tuotettiin myös pisteaineisto (Kuva 5.) ja niistä haettiin lineaarisia piirteitä, josta saatiin tuloksena suoria piirteitä sisältävä vektorimuotoinen polyline-aineisto joka kertoo maapuiden runkojen paikat (Kuva 6).

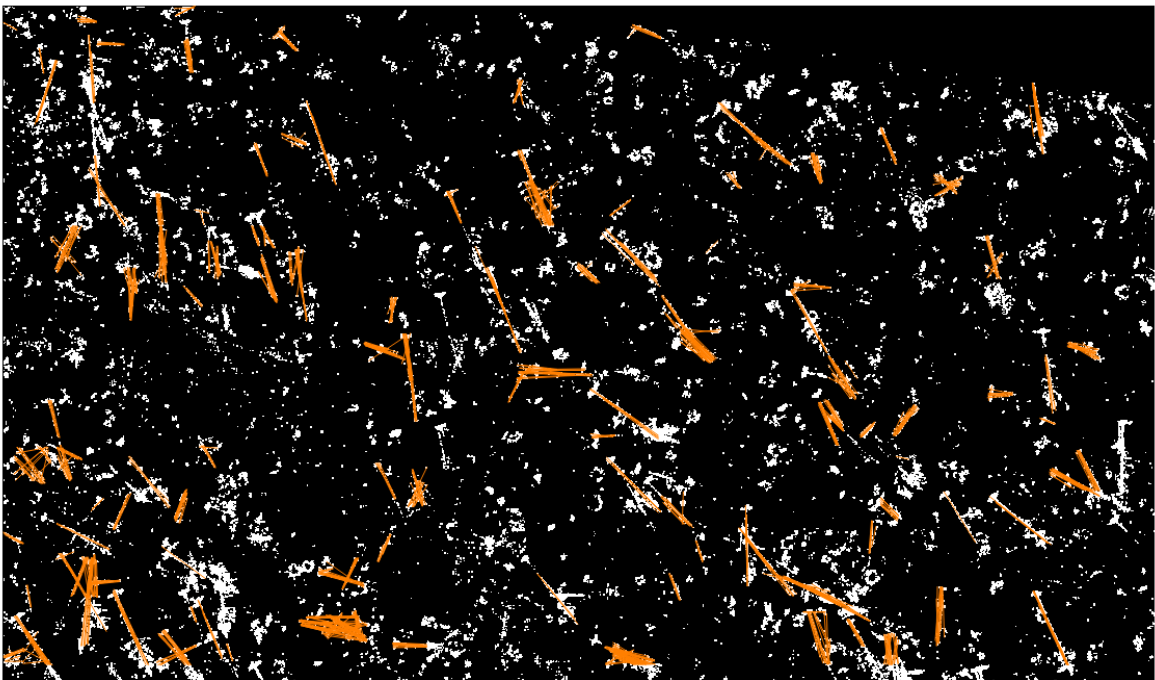
Testausvaiheessa tulkinta toteutettiin koko Heinäveden ja Oulun keilausaineistoille ja tuloksia tarkasteltiin silmävaraisesti piirreaineistolta ja verrattiin puukarttakoealoilta löytyneisiin maapuihin (Kuva 4.). Puukarttakoealojen maapuista löytyi vain hyvin pieni osa.



Kuva 4. AI tunnistuksen tulos maapuiden tunnistamisessa. 62 % opetuksesta labelöidyistä LiDAR piirreaineistolla näkyvistä maapuista tunnistui oikein. Muutamia tunnistamattomia ihmissilmin havaittavia puitakin kuvalta löytyy. Toisaalta malli onnistui tunnistamaan puita, jotka jäivät opetus- ja testiaineistoa tekevältä henkilöltä huomaamatta.



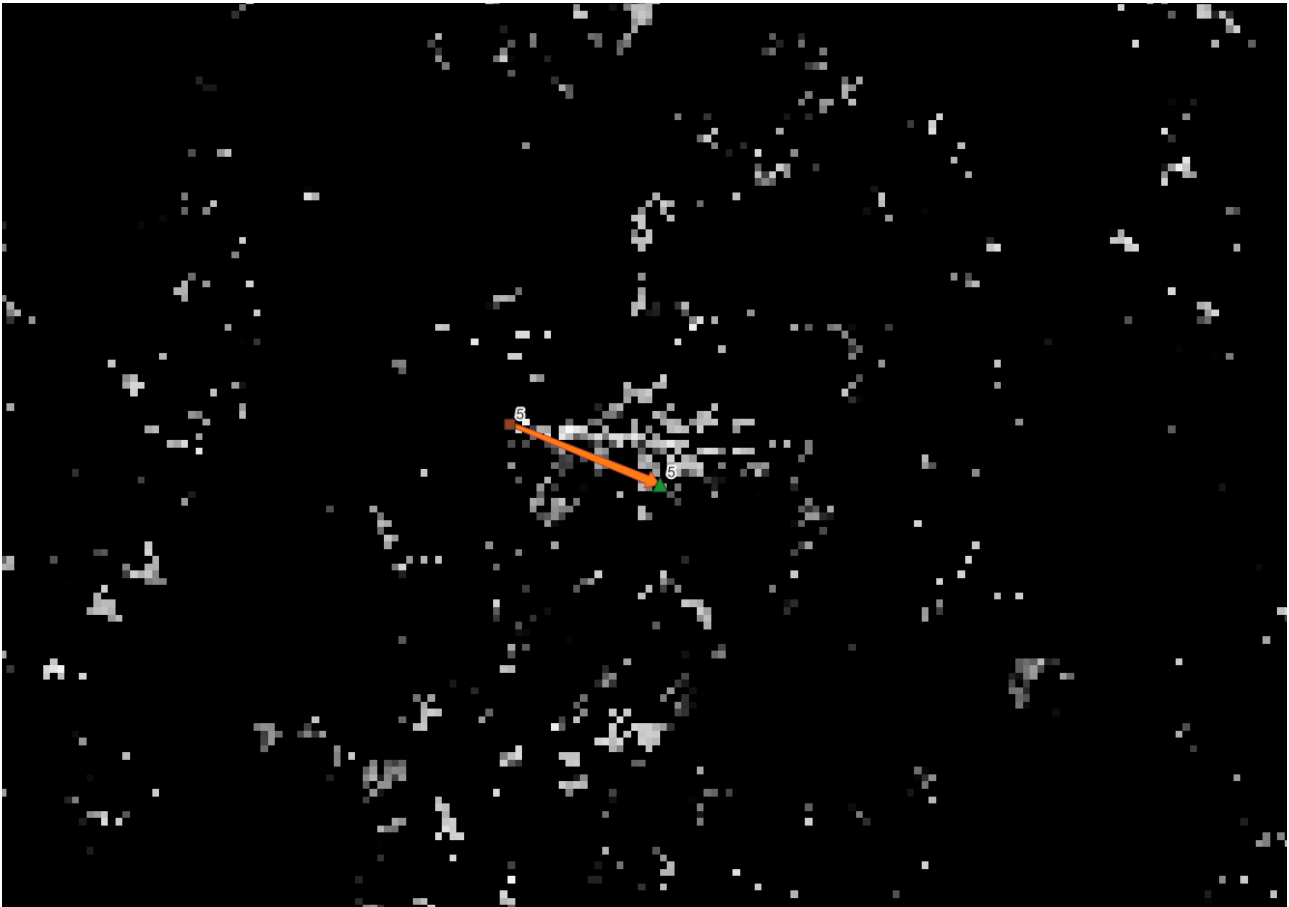
Kuva 5. AI tunnistuksen tulos maapuiden tunnistamisessa esitettynä pisteinä tunnistetun puun keskellä.



Kuva 6. AI tunnistuksen tulos maapuiden tunnistamisessa. Tunnistetun bounding boxin ("chip") sisällä puun paikka on haettu käyttämällä lineaaristen piirteiden tunnistusalgoritmia. Algoritmi tunnistaa saman rungon useita kertoja. Jälkikäsitellyssä poistettiin saman puun useat tunnistukset pois-tetaan.

Tunnistetut puut asettiin maastoreferenssiaineiston päälle ja referenssiaineistoa käytettiin tunnistustarkkuuden estimointiin. Kuvassa 2. näkyy koelalta löytynyt maapuu, joka erottuu

laserkeilausaineistossakin. Puun tyvi on oikealla kohdalla, mutta suunnassa on eroa maastoaineistoon.



Kuva 6. Koealalla oleva maapuu oranssilla värillä esitettynä ja vastaava LiDAR piirretaso. Aineistoa vertailtaessa näyttää siltä, että puiden tyven paikka on tarkasti määritetty maastossa mutta rungon kompassisuunnassa tuntuu olevan jonkin verran hajontaa.

Kuvassa 7, on esitetty mallin suoriutumista tunnistustehtävästä. Tunnistusvirhe raportoitiin confusion matrixin muodossa ja tunnistuksen tarkkuusprosentteina. Sekä omissio- että kommissiovirheet raportoitiin. Opetusaineistosta poimitusta testiaineistosta kokonaistarkkuudeksi tuli 52%. Tunnistetuista puista 43% oli opetusaineiston mukaan oikeita. Opetusaineistossa olevista kuolleiksi maapuiksi opetetetuista puista 63 % löytyi.

		Prediction	
		P	N
Actual	P	812 (TP)	428 (FN)
	N	1069 (FP)	837 (TN)

Actual:

Labels produced by Arbonaut

Prediction:

Inference results

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad 0.524157661$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad 0.431685274$$

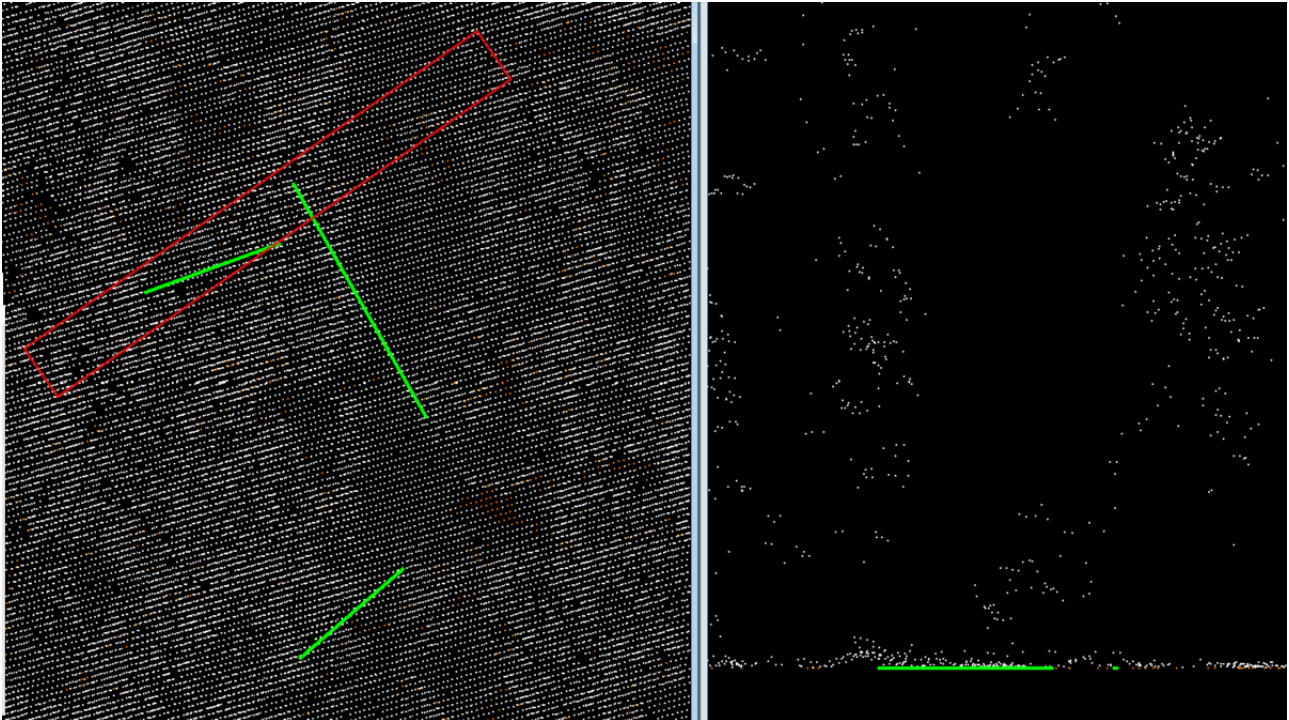
$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad 0.65483871$$

$$F_1 = \frac{2}{\frac{1}{\text{Precision}} + \frac{1}{\text{Recall}}} \quad 0.520346043$$

Kuva 7. Kuolleen maapuun tunnistamistulos opetusaineistosta poimittuun testiaineistoon verrattuna.

Mielenkiintoinen tulos oli, että puukarttakoealoilla olleista maapuista ei tunnistettu montakaan. Puita tarkasteltiin suoraan keilauspisteaineistojen poikkileikkauksilta (Kuva 8.). Todettiin että aivan maan pinnassa olevat maapuut menevät maapisteluokkaan ja sekoittuvat muihin maan pinnan piirteisiin. Maan pinnasta selvästi koholla olevat puut näkyvät piirretasolla hyvin. Tulos on osin yllättävä: Kaatuneita puita löytyy maisematasolta runsaasti. Kuitenkaan puukarttakoealojen maapuista tunnistetaan vain hyvin pieni osa, koska puukarttakoealojen maapuut ovat usein jo painuneet maan pintaan ja osin lahonneet. Tästä voisi päätellä, että maasta koholla olevia kaatuneita puita on maisematasolla runsaasti koska niitä tulee runsaasti piirretasolle ja tunnistetaan. Kaatuneiden puiden esiintyminen on kuitenkin melko ryhmittäistä. Puukarttakoealat, jotka sijoitetaan pääosin metsänhoito-ohjeiden mukaan hoidetuille kuvoille ja joiden sijoittelussa vältetään ns. "poikkeavia"

puustoja, eivät ilmeisesti kokeneet kovin paljoa tuulituhhoa tms. puita kaataneita luonnonilmiöitä.



Kuva 8. Puukarttakoealoilla olevia maapuita, osoitettu vihreällä viivalla. Punaisen laatikon alueelta tehty keilausaineiston poikkileikkaus on esitetty oikealla. Vihreä viiva osoittaa maapuun paikan poikkileikkauksella. Kuten poikkileikkauksesta näkyy, ei tämä maapuu ole tältä keilausaineistolta havaittavissa.

Mihin kuolleen maapuun tunnistaminen sopii? Laserkeilausaineistot tarjoavat työkalun nähdä ylimmän, peitteisenkin latvuserroksen alle ja poimia sieltä piirteitä jotka selittävät luontoarvoja. Selvästikään kaikkien maapuiden tunnistaminen ei ole kuitenkaan keilaamallaakaan mahdollista 20 pt /m² aineistoilla. Usein kuollut maapuu ja -pystypuu keskittyvät joihinkin kohteisiin, joissa olosuhteet ovat niitä tuottaneet. Vaikka jokaista puuyksilöä ei onnistuttaisikaan poimimaan, runsaasti näitä luontopiirteitä sisältävät kohteet löytyvät tulkitulta aineistolta hyvin.

Metsähallitus käytti kansalliselta 5 pt/m² laserkeilausaineistolta ja puukarttakoealoilta tuotettua kuolleen pystypuun tulkinta-aineistoa vanhojen metsien kartoituksen apuna v. 2024 aikana. Arbonaut toimitti aineiston. Aineisto tuki hyvin maastotyön kohdentamista kiinnostaviin kohteisiin. Vastaava menettely toiminee myös runsaasti maapuuta sisältävien kohteiden tunnistamisessa ja tarjoaa tällä tavoin työkalun arvokkaiden luontoarvokohteiden kartoittajan työkalupakkiin.

4.4 Ylimääräinen työpaketti. Kuolleen pystypuun tunnistaminen ilma- ja satelliittikuva-aineistoilta

4.4.1 Satelliittikuvapohjainen kuolleiden pystypuiden tunnistus CollectiveCrunch

CollectiveCrunchin lähestymistapa käyttää korkean resoluution väärävärisiä ilmakuvia (julkisesti saatavilla Maanmittauslaitokselta) maastotietojen luomiseen yhdessä matalamman resoluution satelliittidatan (Sentinel-2, julkisesti saatavilla Euroopan avaruusjärjestöltä) kanssa suurten alueiden karttojen tuottamiseen. Ilmakuvia käytetään kuolleiden/terveiden puiden merkintöjen manuaaliseen tekemiseen ja arvioimaan, kuinka paljon 10x10m pikselistä on kuolleiden puiden latvusten peitossa. Näitä merkintöjä täydennetään maastotiedoilla, jotka on kerätty toimittajan puolesta.

Taulukko: CollectiveCrunch toimitti kuolleen puun tilavuusarviot ja kuolleen puun keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan Sentinel-2 10x10m ruudukossa sekä 16x16m ruudukossa (joka vastaa Metsäkeskuksen metsäinventointeja).

	Tilavuus, m3/ha	Tilavuus, m3	Läpimitta, cm
MAE (%)	1.29 (65.44%)	2.06 (71.22%)	1.92 (8.83%)
RMSE (%)	1.75 (88.89%)	2.64 (91.43%)	3.07 (14.14%)
Harha	0.06	0.45	0.62

4.4.2 Ilmakuvapohjainen kuolleiden pystypuiden tunnistus Sitowise

Sitowisen menetelmä tunnistaa kuolleita puita tai puuryhmiä ilmakuvista, erityisesti puita, joissa lehdet tai havut ovat vielä kiinni. Tämä vastaa kuusissa vaihetta, jossa neulaset ovat kuolleet mutta vielä kiinni puussa. Validointidata sisältää puukarttakoealoja Oulun ja Heinäveden alueilla, joissa kuolleiden pystypuiden tunnistus tehdään. Koealoilta on toimitettu puukohtaista tietoa, joista voidaan lukea kuolleiksi määritellyt puut.

Kuolleiden puiden automaattisessa tunnistuksessa käytetty menetelmä kohdistuu puiden latvukseen, kun taas koealoissa puun paikka mitataan alaosaan. Tämä aiheuttaa siirtymää validointidatan paikkatiedossa ilmakuvien ominaisuuksista johtuen. Evaluointia varten on käytetty 15 metrin hyväksymismarginaalia validointidatan ja tunnistuksen välillä.

Validointidatan visuaalinen tarkastelu osoittaa, että merkittävä osa validointipuista ei ole nähtävissä ilmakuvista. Tämän vuoksi validointipuista on suodatettu pois ympäröivän latvuksen alla olevat, pienet puut ja vain kuolleet pystypuut on otettu huomioon. Validointi on suoritettu näillä suodatetuilla puilla.

Validoinnissa on käytetty kattavuutta (recall) metriikkana, joka kuvaa todennettujen kuolleiden puiden tunnistamisen osuutta. Tulokset vaihtelevat eri karttalehtien välillä.

Taulukko: Kuolleiden puiden tunnistamisen osuus karttalehdittäin

Kartta-lehti	Alue	Validointipuita	Kattavuus (recall) (%)
N5421A	Heinävesi	20	0.0
N5421E	Heinävesi	23	13.04
N5421C	Heinävesi	31	0.0
N5412F	Heinävesi	28	42.86
N5412E	Heinävesi	9	0.0
N5412D	Heinävesi	21	47.62
N5412C	Heinävesi	43	4.65
N5412B	Heinävesi	1	0.0
N5412A	Heinävesi	24	33.33
N5411B	Heinävesi	24	58.33
N5411F	Heinävesi	2	0.0
N5411D	Heinävesi	34	20.59
Koko alue	Heinävesi	260	21.54
R4423F	Oulu	4	0.0
R4424C	Oulu	2	0.0
R4424E	Oulu	7	0.0
R4423D	Oulu	4	0.0
R4423E	Oulu	17	0.0
R4414F	Oulu	27	11.11
R4414E	Oulu	18	0.0
R4413F	Oulu	23	0.0
Koko alue	Oulu	102	2.94

4.4.3 Ilmakuvapohjainen kuolleiden pystypuiden tunnistus Koko Forest Oy

Koko Forest Oy:n ilmakuvapohjaisessa tulkinnessa kuolleiden pystypuiden tunnistamiseen käytettiin erityistä tietokoneohjelmaa, joka perustuu ilmakuvien analysointiin. Ohjelma hyödyntää syväoppimista ja konvoluutioneuroverkkoja, jotka on opetettu tunnistamaan kuolleet puut. Tämä menetelmä on julkaistu tieteellisessä artikkelissa (Junttila ym. 2024). Menetelmää on kehitetty edelleen niin, että sillä pystyy erottamaan yksittäiset puut toisistaan, sen sijaan että ne näkyisivät yhtenä suurena alueena.

Jokaiselle tunnistetulle kuolleelle puulle laskettiin läpimitta ja tilavuus Metsäkeskuksen avoimen metsävaratiedon perusteella. Yksittäisen puun mitat arvioitiin metsävarahilaan perustuen. Puiden tilavuuden laskemiseen käytettiin Laasasenahon malleja, jotka perustuvat puun rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen. Mallin valinta tehtiin pääpuulajin mukaan, ja lehtipuille käytettiin koivun tilavuusmallia. Samoja malleja käytettiin sekä ilmakuvien että maastoaineiston perusteella.

Taulukko: Tilavuuden ja läpimitan absoluuttiset ennustetarkkuudet hilatasolla

	Tilavuus, m ³		
Alue	RMSE	MAE	Harha
Heinävesi	2.47	1.84	-0.61
Oulu	1.83	1.11	-0.18
	Läpimitta, cm		
Alue	RMSE	MAE	Harha
Heinävesi	8.68	7.3	5.58
Oulu	7.32	6.3	5.46

5 Tulosten tarkastelu Suomen metsäkeskuksen tiedontuotannon näkökulmasta

Hankkeen tavoitteena on saada luotettava kuva kuolleen pysty- ja maapuun arviontitarkkuudesta hankkeessa käytetyillä menetelmillä ja arvioida hankkeen tulosten perusteella sitä, voitaisiinko kuolleen pysty- tai maapuun ennustaminen ottaa mukaan Suomen metsäkeskuksen tuotannon yhdeksi muuttujaksi nykyisillä tai ennakoitavilla tulevaisuuden kaukokartoitusaineistoilla.

Hankkeen tulokset osoittavat, että monikanavaiseen laserkeilausaineistoon perustuva kuolleen pystypuuston tulkinta on luotettava tapa arvioida kuolleen pystypuuston määrää ja tarkkaa sijaintia eri tyyppisissä metsiköissä (tutkimusalueilla). Tulokset ovat koealatasolla parhaillaan hyviä ja käytännön maastokäyntien havainnot tukevat koealatason validonnin tuloksia. Kuolleen puun ennusteet ovat melko johdonmukaisia erilaisten metsiköiden välillä, mikä käytännössä tarkoittaa sitä, että ennusteiden suhteelliset tasot vaihtelevat loogisesti maastossa havaitun kuolleen puun määrän kanssa.

Ilmakuvapohjainen kuolleen pystypuun tunnistaminen ei toimi niin hyvin kuin monikanavaiseen laserkeilausaineistoon perustuva tunnistaminen. Ilmakuvilta voidaan tunnistaa vain ne kuolleet puut, jotka selkeästi erottuvat kuvissa eli varjoissa tai päällimmäisen latvuseroksen alla olevia olevia puita ei voi nähdä. Periaatteessa molemmilla tässä hankkeessa tuotetuilla ilmakuvapohjaisilla tulkintamenetelmillä tunnistetaan vain ne puut, jotka ovat ihmissilmällekin nähtävissä. Ilmakuvien laatu kuitenkin vaihtelee laserkeilausaineistoja enemmän. Säätila, vuoro- ja kasvukauden ajankohta vaikuttavat siihen, miten laadukkaita kuvia saadaan otettua. Myös olosuhteiden erot eri kuvausalueiden välillä vaikuttavat siihen, miten hyvin tietyllä kuva-aineistolla opetettu teköälymalli toimii toisilla alueilla.

Monikanavaisen laserkeilausaineistoon perustuva kuolleen maapuun tulkinta on tämän hankkeen tulosten perusteella erittäin haastavaa, eivätkä koealatasen tarkkuustulokset ole hyviä. Maapuutulkinta löytää kohteet hyvin, jos kyseessä on merkittävä metsätuhoalue tai kun yksittäiset kaatuneet puut ovat kookkaita ja selkeästi maanpinnantason yläpuolella. Pitkälle lahonneet tai muuten maanpinnan tasoon kaatuneet puut eivät erotu laserkeilausaineistosta pistepilvestä, eikä niitä voi suoraan tunnistaa millään menetelmällä. Kuitenkin kuolleen maapuun ennusteissa on havaittavissa samankaltainen johdonmukaisuus, kuin kuolleen pystypuuston ennusteissa. Alueilla, joissa on mallien perusteella paljon kuollutta maapuuta, löytyy myös kuollutta maapuuta suhteessa enemmän kuin alueilta, joissa malli on tuottanut vähäisiä määriä kuolleen maapuun ennustetta.

6 Ilmasto- ja monimuotoisuusvaikutukset

Kuolleen puun inventointitiedon käyttöä ilmasto- ja monimuotoisuustavoitteiden saavuttamisessa on mahdollista edistää, jos kuolleen puun inventointi saadaan mukaan inventointiohjelmaan Kallio II aikakaudella ja kerätty kaukokartoitusdata on nykyistä tarkempaa. Tämän hankkeen tulosten perusteella kuolleen pysty- ja maapuun kartoitus vaatii nykyisiä laserkeilausaineistoja tarkempien aineistojen keruun.

Metsätuhojen ennaltaehkäisy ja toteutuneiden tuhoalueiden kartoitus. Viimeisimmässä valtakunnan metsien inventoinnissa yksi iso uusi huolenaihe on yksittäisten kuolleiden puiden merkittävä kasvu. Tällä on oletetaan olevan vaikutusta Suomen metsien kokonaiskasvuun. Kuolleiden yksittäisten puiden kaukokartoitusperusteinen inventointi auttaisi näiden tuhojen tunnistamisessa operatiivisen toiminnan tarpeisiin.

Monimuotoisuuden kannalta potentiaalisten kohteiden kartoitus voisi olla mahdollista kuolleen pysty- ja maapuutiedon avulla. Vaikka maapuutieto ei ole absoluuttisen tarkkaa, eikä siitä tämän hankkeen tulosten perusteella saada tarkkaa edes tiheillä laserkeilausaineistoilla, sen käytöstä voisi olla hyötyä kartoitustyössä, koska tuote toimii loogisesti eri alueiden välillä.

Hankkeessa kehitetyllä menetelmällä tehtiin laajojen alueiden kuolleiden pystypuiden ennustamista Metsähallituksen alueilla Pohjois-Suomessa. Tuotettu tieto ei ollut yhtä tarkkaa, kuin hankkeessa kerätty tieto monikanavaisella laserkeilausaineistolla, mutta silti se oli käyttökelpoista. Tietoa käytettiin tausta-aineistona apuna vanhojen metsien inventoinnissa. Metsähallituksen mukaan tiedosta oli hyötyä maastotyössä ja se helpotti ja nopeutti kohteiden inventointia, jolloin kohteiden inventointiin kuluu vähemmän työaikaa ja matka-aikaa, jolla on positiivisia ilmastovaikutuksia. Käytössä oleva tieto kuolleiden puiden sijainnista parantaa myös inventoinnin laatua, jolla on vaikutusta monimuotoisuuden säilymisen kannalta.

7 Rahoitus

Taulukko 6. Hankesuunnitelmassa hankkeen arvioidut kustannukset ja toteutuneet kustannukset toimijoittain.

Arbonaut

Kustannuslaji	Kustannusarvio	Toteuma	Erotus
Palkat ja palkkiot	143 868	144 574,31	-706,31
Matkakulut	4 900	4538,91	361,09
Muut kustannukset	43 160,40	43 372,29	-211,89
Kust.yht	191 928,40	192 485,51	-557,11
MMM osuus	134 349,88	134 739,86	-389,98

Suomen metsäkeskus (100 % tuki)

Kustannuslaji	Kustannusarvio	Toteuma	Erotus
Ostetut palvelut + alv.	211 880	174 639,64	37 240,36
Palkat ja palkkiot	142 500	139 182,37	3 317,63
Matkakulut	34 000	15 470,30	18 529,70
Muut kustannukset	70 050	64 394,39	5 655,61
Kust.yht	458 430	393 686,70	64 743,30

Liitteet

- 1.1. Liite 1. Metsäkeskuksen maksatushakemus
- 1.2. Liite 2. Arbonautin maksatushakemus
- 1.3. Liite 3. KUOPUS-hankkeen maastomittaukset -raportti (toimitettu väliraportin yhteydessä)
- 1.4. Liite 4. Tuensaajatiedot

This documents contains 20 pages before this page

Dokumentet inneholder 20 sider før denne siden

Tämä asiakirja sisältää 20 sivua ennen tätä sivua

Dette dokument indeholder 20 sider før denne side

Detta dokument innehåller 20 sidor före denna sida

authority to sign

representative

custodial

asemavaltuus

nimenkirjoitusoikeus

huoltaja/edunvalvoja

ställningsfullmakt

firmateckningsrätt

förvaltare

autoritet til å signere

representant

foresatte/verge

myndighed til at underskrive

repræsentant

frihedsberøvende