

HELSINGIN YLIOPISTO

Metsäkonetieto puustotulkinnan apuaineistona

MEAPU-hankkeen loppuraportti

*Markus Holopainen, Mikko Vastaranta, Atte Saukkola, Jussi Peuhkurinen, Sanna Sirparanta,
Heikki Astola, Laura Sirro, Tuomas Häme, Timo Melkas, Kirsi Riekk, Juha-Antti Sorsa, Tapio
Räsänen, Jarmo Hämäläinen*

Tiivistelmä

Holopainen, M.¹, Vastaranta, M.¹, Saukkola, A.¹, Peuhkurinen, J.², Sirparanta, S.², Astola, H.³, Sirro, L.³, Häme, T.³, Melkas, T.⁴, Riekk, K.⁴, Sorsa, J.-A., Räsänen, T.⁴, Hämäläinen J.⁴

¹Helsingin yliopisto

²Arbonaut Oy

³VTT

⁴Metsäteho

Hankkeessa kehitettiin hakkuukoneen mittalaitteilla kerättävän puutiedon hyödyntämistä laserkeilaukseen ja satelliittikuviin perustuvassa aluepohjaisessa puustotulkinnassa. Hakkuukonemittaus osoittautui riittävän tarkaksi menetelmäksi puun dimensioiden mittaamiseen puustotulkinnan opetusaineistoksi. Laskenta, jossa hakkuukoneen tietojärjestelmän tiedoista tuotetaan puustotulkinnassa tarvittavat tunnuks, on automatisoitavissa. Lisäämällä hakkuukonekoealoja puustotulkinnan opetusaineistoon ja hyödyntämällä tietoa hakkuulaitteen sijainnista, voidaan puustotulkinnan tarkkuutta parantaa hieman päätehakkuukohteilla. Mikäli käytettävissä on vain tieto hakkuukoneen sijainnista, merkittävä laadun parannus on vaikeaa, jos puustotulkinnan opetusaineistona on käytettävissä tarkasti mitattu maastokoeala-aineisto. Päätehakkuukohteilla maastokoealat voidaan korvata hakkuukonekoealoilla ilman merkittävää laadun heikkenemistä. Puun sijaintitiedon parantumisen myötä hakkuukonekoealojen käyttöä voidaan todennäköisesti tehostaa nykyisestä merkittävästi, joka voi edelleen parantaa päätehakkuukohteiden puustotulkinnan tarkkuutta ja mahdollistaa esimerkiksi tarkkojen runkolukusarjojen ennustamisen. Laserkeilaukseen perustuvassa puustotulkinnassa optimaalinen hakkuukonekoealan koko riippuu hakkuukoneessa käytetystä puiden paikannusmenetelmästä. Hakkuulaitteen paikannus tarkoittaa koealan puustotunnusten määrityksen luotettavuutta ja mahdollistaa pienempien koealojen käyttämisen kuin ilman hakkuulaitteen paikannusta. Satelliittikuviin perustuvassa puustotulkinnassa ei hakkuukoneaineiston lisäämisellä Sentinel-2 – kuvilla tehtävään puustotunnusten mallintamiseen ole saavutettu merkittävää parannusta verrattuna pelkän maastokoeala-aineiston avulla saavutettuihin tuloksiin. Satelliittikuviin perustuvassa puustotulkinnassa puustotunnukset ennustetaan koealatasolla n. 10%-yksikköä tarkemmin Sentinel-2 satelliittikuvapiirteiden avulla verrattuna vastaavaan Landsat-8 ennusteeseen. Yhteenvedona voidaan todeta, että hakkuukonetietoa uudistuskypsistä metsistä voidaan hyödyntää laserkeilaukseen ja satelliittikuviin perustuvassa aluepohjaisessa puustotulkinnassa. Hakkuukonetiedolla on mahdollista saavuttaa laserkeilaukseen perustuvassa puustotulkinnassa vastaava tarkkuustaso kuin laajan maastokoeala-aineiston käytöllä uudistuskypsissä metsissä. Lisäksi sen avulla on saavutettavissa kustannussäästöjä, mikäli osa maastossa mitattavista koealoista voidaan korvata hakkuukonetietoon perustuvilla koealoilla. Hakkuukonetietoon perustuvan puustotulkinnan tarkkuutta on mahdollista parantaa, tarkentamalla hakattujen puiden sijainnin määrittystä esim. parantamalla hakkuukoneen paikannustarkkuutta ja hyödyntämällä laajemmin hakkuulaitteen sijaintitietoa puustotietojen määrittäksessä koealoille.

Sisällys

TAUSTA JA TAVOITE	4
AINEISTOT	5
Tutkimusalue ja maastokoeala-aineisto	5
Hakkuukoneaineisto	6
Laserkeilausaineisto ja ilmakuvat	7
Satelliittikuva-aineistot	7
Menetelmät	8
Hakkuukoneaineiston käsittely	8
Hakkuukoneaineiston käyttö operatiivisen laserkeilausinventoinnin opetusaineistona	8
Hakkuukoneaineiston käyttö satelliittikuvatulkinnan opetusaineistona	12
Tulokset ja tarkastelu	13
Hakkuukoneaineiston käyttö laserkeilausinventoinnin opetusaineistona	13
Hakkuukoneaineiston käyttö satelliittikuvatulkinnan opetusaineistona	14
Johtopäätökset	20
Lähteet (Hankkeen julkaisut lihavoitu)	20

TAUSTA JA TAVOITE

Suomen metsäkeskus kerää kuviokohtaista metsävaratietoa yksityismetsätalouden suunnittelua sekä metsäteollisuuden puunkorjuun suunnittelua varten ja on merkittävin yksityismetsistä kuviokohtaista metsävaratietoa keräävä toimija (Suomen metsäkeskus 2016). Kerätyn metsävaratiedon avulla metsäteollisuus ja metsäalan toimijat pyrkivät suunnittelemaan tehtaiden puuhuoltoa, kohdentamaan markkinointia, seuraamaan toimenpiteiden toteutusta ja ohjaamaan puunkorjuun ja metsänhoidon operaatioita. Suomen metsäkeskus on vuodesta 2011 lähtien käyttänyt inventointimenetelmänä laserkeilausaineistoon, ilmakuviin ja maastomittauksiin perustuvaa aluepohjaista inventointimenetelmää (ABA). Inventoitavat alueet ovat kooltaan 100 000 – 200 000 hehtaaria ja jokaiselta inventointialueelta mitataan 600 - 800 maastokoealaa (Holopainen ym. 2015).

Laserkeilaukseen, ilmakuviin ja maastokoealoihin perustuvassa puustotulkinnassa maastokoealojen määrä ja laatu ovat keskeisiä ennustetarkkuuden kannalta (Gobakken ja Næsset 2009; Frazer ym. 2011). Hakkuukone kaataa ja mittaa Suomessa päivittäin yli miljoona puuta (Melkas ja Hämäläinen 2015), mutta tätä tietoa ei kuitenkaan toistaiseksi hyödynnetä tehokkaasti. Hakkuukoneen mittaamat puut voisivat tarjota automaattisesti täydentyvän maastomittaustietokannan puustotulkinta-sovellusten käyttöön (Lindroos ym. 2015). Hakkuukoneet mittaavat kaadetuista rungoista useita läpimittoja sekä käyttöosan pituuden. Lisäksi jokaiselle kaadetulle puulle määritetään puulaji ja sijainti – joko hakkuukoneen tai tulevaisuudessa yhä useammin myös hakkuulaitteen sijainti puuta kaadettaessa. Hakkuukonemittausten hyödyntäminen voisi tehostaa nykyistä metsävaratiedon tuottamista ja parantaa sen laatua. Metsäkonetiedolla voitaisiin korvata osa kaukokartoitusinventointien tarvitsemista maastokoealoista sekä kerätä puuston laatutiedon osalta monipuolisempaa tietoa inventointien tueksi. Seuraavan sukupolven metsätietojärjestelmässä yksi tiedon keruutapa on näillä näkyvin operatiivisen toiminnan myötä kertyvä, metsäkoneen tuottama mittaustieto (Holopainen ym. 2014, Metsäteho 2015). Metsäalan toimijat ovat arvioineet metsäkonetiedon hyödyntämisen tehostamisen erittäin tärkeäksi kehityskohteeksi (Arbonaut Oy 2015). Metsäyhtiöiden, koneyritysten ja konevalmistajien yhteistyönä on valmisteltu myös suositus metsäkonetiedon omistusta, käyttöä ja käsittelyä koskevista periaatteista (Metsäteho 2017).

Maastokoealoilta mitattu ja hakkuukoneen mittaama puutieto kuitenkin eroavat toisistaan. Esimerkkinä eroista on mitattavien puiden valinta. Maastokoealoilta yleensä mitataan kaikki rinnankorkeusläpimitaltaan yli tietyn alarajan olevat puut, kun taas hakkuukone mittaa puut, joista voidaan tehdä ainespuuta (Luoma ym. 2017). Hakkuukone mittaa rungoista ainoastaan tukki- ja kuitupuun läpimittavaatimukset (kuidulla minimiläpimitta yleensä 5 cm) täyttävän osan. Jokaiseen hakkuukoneen tuottamaa runkoprofiiliin voidaan kuitenkin sovittaa runkokäyrä, jolloin myös puun pituus, runkomuoto ja latvan tilavuus voidaan mallintaa. Tämä edellyttää, että hakkuukone tallentaa myös runkoprofiilitiedon vähintään 10 cm välein. Puiden ikää hakkuukoneella mitattaessa ei määritetä. Maastokoealoja mitattaessa koealan pääryhmä, kasvupaikka ja kehitysluokka kirjataan, mitä ei hakkuukoneella leimikoita hakattaessa tehdä. Kaukokartoitustulkinnan kannalta ongelmallisinta on kuitenkin yksittäisen puun epätarkka sijaintitieto, josta seuraa, että hakkuukoneen mittaamia puutietoja ei välttämättä saada yhdistettyä täsmällisesti kaukokartoitusaineistoihin. Maastokoealoja mitattaessa koealan sijainti paikannetaan yleensä koealan keskipisteestä tarkalla satelliittipaikannusvastaanottimella (GNSS) ja puiden kuuluminen

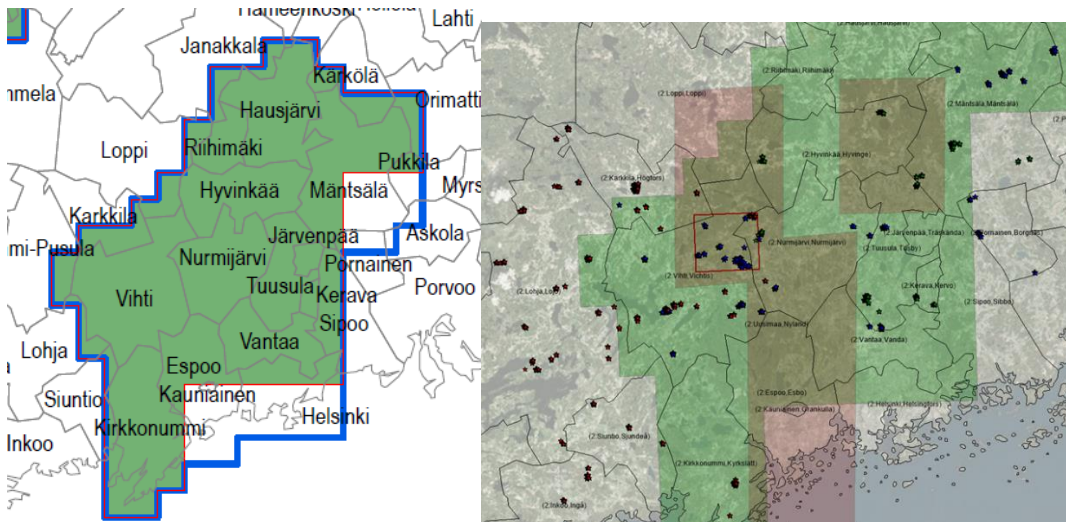
koealalle varmistetaan erillisellä mittalaitteella tai –nauhalla. Hakkuukonemittauksessa koneen sijainti tallennetaan GNSS-vastaanottimella jokaisen puun kaatohetkellä (Melkas ja Hämäläinen 2015). Ratkaisuna yksittäisen puun heikkoon sijaintitarkkuuteen on esitetty hakkuulaitteen paikantamista (Stendahl ja Dahlin 2002; Lindroos ym. 2015). Kaukokartoitustulkinta tarvitsee tiedon myös kaikista koealan puista, jolloin käytännössä vain päätehakkUILta saadaan puustotulkintaan soveltuvaa tietoa.

Tämän hankkeen tavoite on kehittää hakkuukoneella mitatun puutiedon hyödyntämistä laserkeilaukseen ja satelliittikuviin perustuvassa aluepohjaisessa puustotulkinnassa ja siten tehostaa metsävaratiedon tuottamista, parantaa sen laatua ja luoda edellytyksiä seuraavan sukupolven metsätietojärjestelmälle.

AINEISTOT

Tutkimusalue ja maastokoeala-aineisto

Tutkimusalueena oli Suomen metsäkeskuksen pääkaupunkiseudun operatiivinen inventointialue (Kuva 1), jolta oli kerätty kattava (n=614) maastokoeala-aineisto. Koealaotoksen sijoittelu perustui ryväsotantaan, jolla pyritään kattamaan koko inventointialueen alaryhmien, pääpuulajien, pääpuulajien osuuksien, pohjapinta-alan ja keskiläpimitan vaihtelu mahdollisimman hyvin. Maastokoealat olivat säteeltään yhdeksän tai harvapuustoisissa metsässä 12,62 metriä ja niiden paikannustarkkuus on alle metri (Arbonaut Oy 2015). Suomen metsäkeskuksen koealat on kerätty huomioiden alueen metsien vaihtelu, joten koealat kuvaavat tutkimusalueen metsien yleispiirteitä (taulukko 1). Tutkimusalueen puulajijakauma on kuusivaltainen (mänty 37 %, kuusi 45 %, muu 18%). Uudenmaan alueella nuorten kasvatusmetsiköiden, varttuneiden kasvatusmetsiköiden ja uudistuskypsien metsiköiden osuudet metsämaan pinta-alasta ovat 14 %, 44 % ja 21 %.



Kuva 1. Tutkimusaineisto on kerätty operatiivisen toiminnan yhteydessä Suomen metsäkeskuksen pääkaupunkiseudun inventointialueelta. Vasemmalla: Pääkaupunkiseudun operatiivinen inventointialue. Oikealla: Leimikot, joilta hakkuukoneen tuottamat mittaustiedot on kerätty. (Kuvat © Suomen metsäkeskus, Maanmittauslaitos & Metsäteho Oy)

Taulukko 1. Pääkaupunkiseudun inventointialueelta mitattujen maastokoealojen (n=614) puustotunnusten keskiarvot, keskihajonnat ja vaihteluvälit.

Kehitysluokka	D (cm)	H (m)	N (kpl ha ⁻¹)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	V mänty (m ³ ha ⁻¹)	V kuusi (m ³ ha ⁻¹)	V lehtipuut (m ³ ha ⁻¹)
Keskiarvo (keskihajonta)								
<i>Nuori kasvatusmetsikkö</i>	12.5 (2.8)	11.8 (2.7)	2057.2 (1092.9)	17.3 (7.4)	107.3 (61.0)	38.5 (57.6)	31.5 (48.4)	37.2 (48.1)
<i>Varttunut kasvatusmetsikkö</i>	20.3 (3.4)	18.1 (2.6)	1059.5 (593.9)	24.2 (8.9)	214.7 (95.8)	80.9 (92.7)	90.9 (115.8)	42.9 (73.9)
<i>Uudistuskypsä kasvatusmetsikkö</i>	31.1 (5.5)	23.7 (3.4)	697.5 (411.2)	29.6 (9.7)	322.5 (128.9)	73.7 (100.2)	199.4 (175.4)	49.5 (74.7)
Vaihteluväli								
<i>Nuori kasvatusmetsikkö</i>	6.1 - 22.7	5.8 - 19.0	500.0 - 7742.0	2.5 - 37.6	9.5 - 318.2	0.0 - 249.5	0.0 - 260.7	0.0 - 304.1
<i>Varttunut kasvatusmetsikkö</i>	13.4 - 38.1	11.2 - 26.3	240.0 - 3379.0	8.4 - 62.7	67.8 - 728.1	0.0 - 367.3	0.0 - 597.9	0.0 - 728.1
<i>Uudistuskypsä kasvatusmetsikkö</i>	20.4 - 47.3	15.3 - 32.7	80.0 - 2751.0	6.4 - 72.2	57.9 - 924.0	0.0 - 417.4	0.0 - 924.0	0.0 - 469.0

Hakkuukoneaineisto

Hakkuukoneaineisto kerättiin elokuun 2015 ja syyskuun 2016 välisenä aikana yhdeltä Suomen metsäkeskuksen Etelä-Suomen inventointialueelta osana Metsätiedon välitys keskitettyyn tietokantaan ja tietokantasovelluspilotti -kärkihanketta. Aineiston tarkempi kuvaus on esitetty edellä mainitun hankkeen raportissa. Hakkuukoneet jakautuivat valmistajien mukaan seuraavasti: Ponsse (4 kpl), John Deere (1 kpl) ja Komatsu Forest (1 kpl). Suurimpien metsäyhtiöiden kesken koneet jakautuivat tasan – kaksi konetta kultakin metsäyhtiöltä (Metsä Group, Stora Enso, UPM). Jokaiselta leimikon lohkolta tallennettiin StanForD – standardin mukaiset tiedot hakatusta puustosta STM ja PRD -tiedostoihin (StanForD 2019). Leimikoiden lohkot jakaantuivat ensiharvennus-, harvennus- ja päätehakkuuleimikoihin.

Kaiken kaikkiaan aineisto käsitti 635 350 runkoa, jotka oli hakattu 464 kuviolta (>0,5 ha). Laserkeilaustulkintaan käytetty opetusaineisto käsitti yhteensä 158 avohakkuuleimikkoa (> 0,5 ha) ja 207 073 runkoa. Satelliittikuvatulkinnassa käytössä oli koko hakkuukoneaineisto ja siitä muodostetut toimenpidekuvioiden rajaukset hakkuutavasta riippumatta.

Hakkuukoneella tallennettiin rungon prosessoinnin aikana jokaisesta rungosta tunnistetietojen lisäksi seuraavat tiedot: puulaji, käyttöosan läpimitat 10 cm välein (runkoprofiili), käyttöosan pituus sekä viimeisen katkaisusahauksen läpimitta, Lisäksi jokaisesta tehdystä pölkystä tallennettiin pölkyn pituus, latvaläpimitta, tilavuus ja puutavaralaji.

Jokaiselle hakatulle puulle laskettiin tilavuus sovittamalla Laasasenahon (1982) polynomikorjattu runkokäyrä hakkuukoneelta saatuun käyttöosan runkoprofiiliin. Samalla saatiin laskettua myös puun rinnankorkeusläpimitta ja pituus, joita käytettiin runkotilavuuden kanssa puustotietojen muodostamiseen koealoille ja leimikoille.

Hakkuukoneen sijainti tallennettiin jokaiselle puulle WGS84 –formaattissa (World Geodetic System 1984) puun kaatohetkellä. Tämän perusteella voitiin muodostaa kuvioraja sekä hakkuukoneen kulkema ajoura ja kulkusuunta (Melkas & Rieki 2017A). Leimikoille, jotka oli hakattu Komatsu

Forest 931.1 -hakkuukoneella, oli mahdollista määrittää kaksi eri vaihtoehtoista rungon sijaintia, joita käytettiin kaukokartoituksen opetusaineistona: 1) hakkuukoneen GNSS -sijainti (XY_H) sekä 2) hakkuukoneen laskennallisesti parannettu GNSS -sijainti, joka perustui hakkuulaitteen anturointiin (XY_{HH}). Menetelmä hakkuulaitteen sijainnin laskennalliseen tarkentamiseen on esitetty julkaisussa Melkas & Rieki 2017B.

Laserkeilausaineisto ja ilmakuvat

Tutkimuksessa käytetty lentolaserkeilausaineisto ja ilmakuva-aineisto on Blom Kartta Oy:n kesäkuun ja elokuun 2015 välisenä aikana keräämää. Aineistot kerättiin Suomen metsäkeskuksen puustotulkinta -hanketta varten yhdessä Maanmittauslaitoksen kanssa. Lentolaserkeilauksen pulssitiheys oli keskimäärin 1,77 pulssia/m² ja lentokorkeus keskimäärin 2050 metriä. Laserkeilauksessa käytetyt lento- ja keilausparametrit on esitetty taulukossa 2. Ilmakuvauksessa lentokorkeus oli keskimäärin 5022 metriä ja käytössä oli Vexcel UCXp- sekä S/N UC-SXp-kamerat. Vierekkäisten ilmakuvapikselien keskipisteiden etäisyys maanpinnalla oli 30 cm.

Taulukko 2. Uudenmaan inventointialueelta kesällä 2015 kerätyn lentolaserkeilausaineiston parametrejä.

Parametri	Arvo	Yksikkö
<i>Lentonopeus keilauksen aikana</i>	311	solmua
<i>Lentokorkeus (keskimääräisestä maanpinnasta)</i>	2050	m
<i>Puoli-avauskulma</i>	20	°
<i>Keilaustaajuus</i>	45.3	Hz
<i>Pulssitaajuus</i>	114.6	kHz
<i>Sivupeitto</i>	20	%
<i>Keskimääräinen pistetiheys</i>	1.77	Kpl m ⁻²
<i>Maksimipisteväli lentosuunnassa</i>	1.97	m
<i>Maksimipisteväli peilin liikkeen suunnassa</i>	1.97	m
<i>Multipulse käytössä</i>	kyllä	
<i>Signaali-kohinasuhde</i>	17.4	

Satelliittikuva-aineistot

Hankkeen satelliittikuvia hyödyntävässä osuudessa vertailtiin kahden verrattain uuden keskiresoluution satelliitin Sentinel-2¹ ja Landsat 8² suorituskykyä puustotunnusten estimoinnissa, sekä hakkuukoneaineiston käyttöä satelliittipohjaisten puustotunnusmallien referenssiaineistona. Sentinel-2 ja Landsat-8 -satelliiteista tilattiin kuvat kasvukaudelta 2015 (kuvauspäivämäärät 17.8.2015 ja 8: 20.8.2015 vastaavasti). Tutkimuksessa käytettiin pintarefleksseihin kalibroituja BOA-pikseliarvoja (BOA = Below of Atmosphere). Landsat 8 -kuvalle tehtiin pilvimaski visuaalisella tulkinnalla, Sentinel-2 -kuvassa ei havaittu pilviä lainkaan. Maastokoealoja ja hakkuukoneleimikoita vastaavista satelliittikuvan pikseleistä poimittiin kuvien reflektanssitieto, paitsi kanavilta 1, 9 ja 10 (Sentinel-2) ja 8 ja 9 (Landsat 8) (Taulukko 3).

¹ Sentinel-2: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2

² Landsat 8: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/>

Taulukko 3. Hankkeessa käytetyn satelliittiaineiston ominaisuuksia. Tutkimuksessa ei käytetty harmaalla fontilla tulostettuja kanavia.

Sentinel-2 MSI				Landsat 8 OLI			
Band	Description	Wavelengths (nm)	Resolution (m)	Band	Description	Wavelengths (nm)	Resolution (m)
1	Coastal aerosol	433 – 453	60	1	Violet-deep Blue	433 – 453	30
2	Blue	458 – 523	10	2	Blue	450 – 515	30
3	Green	543 – 578	10	3	Green	525 – 600	30
4	Red	650 – 680	10	4	Red	630 – 680	30
5	Vegetation Red Edge (RE1)	698 – 713	20				
6	Vegetation Red Edge (RE2)	733 – 748	20				
7	Vegetation Red Edge (RE3)	773 – 793	20				
8	NIR	785 – 900	10				
8a	Narrow NIR	855 – 875	20	5	NIR	845 – 885	30
9	Water vapour	935 – 955	60				
10	Shortwave infrared - Cirrus	1360 – 1390	60	9	SWIR - Cirrus	1360 – 1390	30
11	Shortwave infrared (SWIR1)	1565 – 1655	20	6	Shortwave infrared (SWIR1)	1560 – 1660	30
12	Shortwave infrared (SWIR2)	2100 – 2280	20	7	Shortwave infrared (SWIR2)	2100 – 2300	30
				8	Pan-Chromatic	500 – 680	30

Menetelmät

Hakkuukoneaineiston käsittely

Tässä kappaleessa on kuvattu pääpiirteittäin menetelmät hakkuukoneaineiston käsittelyn osalta. Varsinainen menetelmäkehitys ja hakkuukoneaineiston esikäsittely on tehty ja kuvattu yksityiskohtaisemmin Metsätiedon välitys keskitettyyn tietokantaan ja tietokantasovelluspilotti -hankkeessa osana Metsätieto ja sähköiset palvelut -kärkihanketta.

Hakkuukoneella kerätyt STM ja HPR -tiedostot purettiin Metsätehon purkuohjelmilla ja tallennettiin tietokantaan. Jokaiselle lohkolle muodostettiin yksilöllinen tunnistetieto perustuen sopimusnumeroon, lohkon tunnisteeseen, hakkuun aloitusaikaan ja alalohkon numeroon. Tieto lohkon hakkuutavasta kerättiin metsäyhtiöiltä ja linkitettiin aineistoon. Aineisto tarkastettiin manuaalisesti. Hakkuukoneella hakattujen puiden kokonaistilavuus laskettiin runkokohtaisesti ja tuloksena saatiin jokaiselle rungolle yksilöllinen kannon korkeus sekä estimaatti maastomittausta vastaavasta rinnankorkeusläpimitasta.

Hakkuukoneen rekisteröimät lohkot jaettiin toimenpidekuvioiksi puustotunnusten laskentaa varten puoliautomaattisella menetelmällä, joka perustuu hakkuukoneen tuottamaan GNSS -sijaintitietoon (Melkas & Riekkö 2017A). Toimenpidekuvion pinta-alat laskettiin paikkatieto-ohjelmassa ja tallennettiin tietokantaan, jonka jälkeen laskettiin puustotunnukset kuvioille käyttäen runkokohtaisia kokonaistilavuuksia sekä pituus- ja rinnankorkeusläpimittaestimaatteja. Jokaiselle

toimenpidekuviolle laskettiin seuraavat tunnuksat: pohjapinta-ala, hehtaariohtainen keskitalavuus, pohjapinta-alalla painotetut keskitalpimita ja keskitalpituus.

Puiden sijaintitarkkuutta tarkennettiin hakkuulaitteen sijaintia korjaavalla laskennallisella menetelmällä (Melkas & Rieki 2017B). Laskennallisesti tarkennettu hakkuulaitteen sijainti puun kaatohtella (XY_{HH}) määritettiin käyttäen keskitalvoistettua hakkuukoneen sijaintia, suodatettua hakkuukoneen kulkusuuntaa sekä puomin suuntaa ja etäisyyttä suhteessa hakkuukoneeseen. Hakkuukoneen paikannusepätkkuuden takia tutkimuksessa ei käytetty hakkuulaitteen tallennettua raakasijaintia, koska hakkuukoneen sijaintivirhe siirtyy sellaisenaan myös hakkuulaitteen sijainnin virheeksi. Laskennallisella menetelmällä tarkennettiin hakkuulaitteen sijaintiin perustuneet puukohtaiset sijainnit (XY_{HH}) Komatsu Forestin leimikoilla ja näitä sijainteja käytettiin puustotunnusten estimoinnissa koealoille.

Lisäksi hankkeessa testattiin puukohtaisten sijaintien simulointimenetelmää, joka perustuu hakkuukoneen sijaintiin ilman, että mitattuja puukohtaisia tietoja hakkuulaitteen sijainnista on tallennettu (Peuhkurinen ym. 2019). Aputietoina käytettiin Komatsu Forest 931.1 hakkuukoneen tiedoista saatuja, aiempia hakkuulaitteen kulma- ja etäisyyssjakaumia. Puuta siirrettiin hakkuukoneen ajouran suunnassa siten, että niiden sijainti vastasi keskimääräistä hakkuuetäisyyttä koneeseen nähden (Rasimäki & Melkas 2005). Puut myös sijoitettiin satunnaiseen tilajärjestykseen koko toimenpidekuvion alalle, sen sijaan että ne olisivat sijainneet ainoastaan ajourilla kuten hakkuukoneen sijainnit. Menetelmän avulla saatiin parannettua puukohtaista sijaintia verrattuna pelkän keskitalvoistetun hakkuukoneen sijainnin käyttöön nähden, koska systemaattinen sijainnin virhe pieneni. Myös puiden sijainti toisiinsa nähden todennäköisesti parani.

Hakkuukoneaineiston käyttö operatiivisen laserkeilausinventoinnin opetusaineistona

Hakkuukoneaineiston käyttöä operatiivisen laserkeilausinventoinnin apuaineistona testattiin ja kehitettiin otantasimulaattorin avulla. Testiä varten kirjoitettiin R-ohjelmalla otantasimulaattori, jolla voitiin jakaa aineisto opetus- ja testiaineistoihin ja sovittaa laserinventointimalli useita kertoja automaattisesti. Simulaattorilla tutkittiin seuraavien parametrien vaikutusta ennustemallien suorituskykyyn:

- hakkuukonekoealojen pinta-ala
- hakkuukonekoealojen lukumäärä
- puulajisuhte (kuusivaltaiset metsiköt vs. sekapuustot)
- hakkuukonekoealojen esivalinta laserpiirteiden avulla (ilman esivalintaa vs. esivalinnannalla)
- hakkuukoneaineiston sijainnin laskennallinen parantelu (paranneltu vs. alkuperäinen aineisto).

Testeissä tarkasteltiin keskitaltunnuksia, puulajeittaisia keskitaltunnuksia ja läpimittajakaumia. Keskitaltunnusten testit tehtiin sekä lineaarisilla regressiomalleilla että k:n samankaltaisimman naapurin menetelmällä (k-MSN). Puulajeittaiset tunnuksat ja jakaumatunnukset estimoititiin vain k-MSN -menetelmällä.

Hakkuukoneaineisto sisälsi 150 päätehakkuuleimikkoa, jotka olivat kooltaan yli 0,5 ha. Kuusi oli aineiston yleisin puulaji. Aineiston 246 471 rungosta kuusia oli 72 %, mäntyjä 7 % ja lehtipuita 21 %. Leimikoista 97 luokiteltiin kuusivaltaisiksi käyttämällä luokitteluperusteena yli 70 % kuusen tilavuusosuutta ja puulajisuhteen merkitystä testattiin toteuttamalla testit vain kuusivaltaisissa leimikoissa ja kaikissa leimikoissa. Leimikoille generoititiin satunnaisesti noin 200 000

koealasijaintia, joihin sijoitettiin neljä erikokoista ympyräkoealaa. Käytetyt koealakoot olivat 253 m², 506 m², 709 m² ja 1012 m². Koealoista pienin edusti niin sanottua normaalia yhdeksän metrin säteistä maastokoealaa ja muut olivat sen kerrannaisia. Koealoille laskettiin puustotunnukset hakkuukoneaineistosta koealan sisään jääviltä rungoilta sekä kaukokartoituspiirteet ilmakuvilta ja laserkeilausaineistolta. Lisäksi testeissä käytettiin aina alueelta Metsäkeskuksen keräämää laserkeilausinventoinnin maastokoeala-aineistoa.

Simulaattorissa aineisto jaettiin jokaisella simulaatiokierroksella satunnaisesti testi- ja mallinnusleimikoihin. Simulointikierroksia oli sata. Mallinnusleimikoista poimittiin satunnaisesti 0, 50, 100, 150, ..., ...1000 generoitua koealaa kullakin koealakoolla. Satunnaisesti poimitut hakkuukonekoealat lisättiin maastokoeala-aineistoon ja näin saatuun mallinnuskoeala-aineistoon sovitettiin ennustemalli. Jokaiselle mallinnuskoeala-aineistolle tehtiin selittävien muuttujien valinta erikseen. Selittävien muuttujien valinta tehtiin käyttäen askeltavaa regressiota (kokonaistunnukset) ja korrelaatioita (puulajitunnukset). Jokaisella simulointikierroksella malli sovitettiin aina erikseen kullekin koealakoko-koealamäärä yhdistelmällä. Mallin estimointi tehtiin siten 81 kertaa jokaisella simulointikierroksella ja 8100 kertaa jokaisessa testissä. Tämän takia käytettiin automaattista muuttujanvalintaa ja muuttujanvalintamenetelmät valittiin niiden laskentanopeuden perusteella.

Hakkuukonekoealojen esivalinta tehtiin keskipituus- ja tilavuusennusteiden perusteella. Valinta tehtiin siten, että maastokoealoihin sovitettun mallin keskipituus- ja tilavuusennusteita verrattiin hakkuukonekoealan puustotietoihin. Jos mallilla ennustettu ja hakkuukonetiedon mukainen keskipituus tai tilavuus poikkesi enemmän kuin mallin keskivirhe oli, kaikki kyseiseen koealapisteeseen sijoitetut hakkuukonekoealat hylättiin. Tällä menetelmällä pyrittiin poistamaan hakkuukonekoeala-aineistosta sellaiset koealat, joilla suurimmalla todennäköisyydellä oli virhettä puustotiedoissa. Toisin sanoen, jos hakkuukonekoealan puustotiedot ja kaukokartoitustiedot eivät riittävästi vastanneet toisiaan, ajateltiin sen indikoivan koealan sijaintivirhettä, jättöpuuryhmää tai muuta poikkeavuutta.

Ennustemallin sovituksen jälkeen mallilla ennustettiin puustotiedot testileimikoille jokaisella simulointikierroksella. Ennustamisessa käytettiin hilamenetelmää, eli tunnukset estimoititiin ensin 16 metrin hilan soluille, joista ne yleistettiin leimikoille.

Ennustettua tulosta verrattiin hakkuukoneen mittaamaan tulokseen leimikkotasolla käyttämällä harhaa ja keskineliövirheen neliöjuurta (RMSE). Jakaumia verrattiin laskemalla Reynoldsin virheindeksi (Reynolds 1988). Jakaumavirheen laskennassa huomioitiin vain läpimittaluokan 16 cm ja sitä suuremmat rungot, koska päätehakkuuleimikoiden hakkuukoneaineistossa pienempien läpimittaluokkien puut ovat huonosti edustettuina.

Paikannustarkkuuden vaikutus

Paikannustarkkuuden vaikutus testistä tutkittiin kuinka paljon hakkuulaitteen paikannus parantaa puustotulkinnan tarkkuutta verrattuna pelkän hakkuukoneen sijainnin tuntemiseen. Testissä tutkittiin myös neljää eri koealakokoa. Tarkkuuden arviointiaineistona tutkimuksessa käytettiin hakkuukoneen sijaintiin paikannettua puutietoa 150 leimikolta, jota kerättiin vuosien 2015 ja 2016 aikana viidellä hakkuukoneella. Puustotunnusten ennustemallien laadinnan opetusaineistona käytettiin Komatsu Forest 931.1- mallisen hakkuukoneen vuoden 2016 kesäkuun alusta elokuun loppuun keräämää hakkuukoneen puutietoa ja hakkuulaitteen laskennallisesti tarkennettua sijaintia rungon kaatohetkellä. Hakkuukoneen keräämässä aineistossa päätehakkuuleimikoita oli yhteensä kahdeksan, joilla puita oli yhteensä 8820. Näille leimikoille oli mahdollista tuottaa kaksi

vaihtoehtoista sijaintia jokaiselle puulle, hakkuukoneen sijainti ja laskennallisesti tarkennettu hakkuulaitteen sijainti puun kaatohtokellä. Vertailtavina tunnuksina olivat puustotunnusten RMSE:t ja harhat, jotka laskettiin leimikkotason puustotunnusten ennusteiden ja vertailukohtana käytettyjen leimikkotason hakkuukonemittausten erotuksista. RMSE-arvot ja harhat laskettiin myös suhteutettuna vertailuaineiston puustotunnusten keskiarvoihin. Paikannustarkkuuden vaikutustestin menetelmä on kuvattu kuvassa 2 Menetelmän tarkempi kuvaus on esitetty julkaisuissa Saukkola (2017) ja Saukkola ym. (2019). Menetelmä hakkuulaitteen tarkennetun sijainnin laskemiseksi ja paikannustarkkuuden määrittämiseksi on esitetty julkaisussa (Melkas & Rieki 2017)

Testiaineisto		Opetusaineisto	
Työvaihe	Hakkuukoneen sijaintiin paikannettu puutieto	Hakkuukoneen sijaintiin paikannettu puutieto	Hakkuulaitteen sijaintiin paikannettu puutieto
1	Leimikoiden muodostaminen ja puustotunnusten laskenta leimikoille	Leimikoiden muodostaminen	Leimikoiden muodostaminen
2		Koealojen muodostaminen leimikoille	Koealojen muodostaminen leimikoille
3		Puustotunnusten laskenta koealoille	Puustotunnusten laskenta koealoille
4		Laserpiirteiden ja ilmakuvapiirteiden laskenta koealoille ja koealayhdistelmien luonti	Laserpiirteiden ja ilmakuvapiirteiden laskenta koealoille ja koealayhdistelmien luonti
5		Selittäjävalinta k-MSN-malleihin	Selittäjävalinta k-MSN-malleihin
6	Hilan luonti testileimikoiden päälle ja kaukokartoituspiirteiden laskenta hilaruuduille		
7		Puustotunnusten ennustaminen testiaineiston hilaruuduille työvaiheen 5 malleilla	Puustotunnusten ennustaminen testiaineiston hilaruuduille työvaiheen 5 malleilla
8		Puustotunnusten yhdistäminen hilalta leimikkotasolle	Puustotunnusten yhdistäminen hilalta leimikkotasolle
9	Leimikkotason ennusteen vertailu paikannustapojen ja käytettyjen koealojen välillä		

Kuva 2. Menetelmä, jolla selvitettiin tarkennetun hakkuukonetiedon vaikutus puustotulkintaan. Opetusleimikoille, joilta hakatut puut oli paikannettu sekä hakkuukoneen että hakkuulaitteen sijaintiin, tehtiin työvaiheet 1-5 ja 7-8 kaksi kertaa. Ensimmäisellä kerralla käyttäen puiden sijaintina hakkuukoneen sijaintia, toisella kerralla käyttäen puiden sijaintina laskennallisesti tarkennettua hakkuulaitteen sijaintia. Testileimikoille, joilta hakatut puut oli paikannettu hakkuukoneen sijaintiin, tehtiin ainoastaan kohdat 1 ja 6. Kohdissa 7-8 laskemisessa käytettiin testileimikoiden päälle muodostettuja hilaruutuja, joille oli ennustettu puustotunnukset erikseen kahdella tavalla paikannettua puutietoa käyttäen.

Hakkuukoneaineiston käyttö satelliittikuvatulkinnan opetusaineistona

Sentinel-2 ja Landsat 8 -satelliittien suorituskyykyä vertailevassa osiossa tehtiin mallit kokonaistunnuksille (runkotilavuus V, keskiläpimitta D, puuston pituus H, pohjapinta-ala G, ja runkoluku N), sekä näiden puulajikohtaisille ositteille (mänty, kuusi, lehtipuut). Vertailua varten määriteltiin 12 testijärjestelyä, joilla testattiin satelliittiaineiston pikseliresoluution ja eri kanavien, erityisesti Sentinel-2:n ns. red-edge-kanavien, vaikutusta metsämuuttujaestimaattien tarkkuuteen. Testitulokset tuotettiin myös molempien instrumenttien aineistot yhdistämällä.

Puustotunnusten estimointia varten toteutettiin iteratiivinen piirrevalinta- ja mallinnusohjelma, jolla tehtiin mallit kullekin puustotunnuslleerikseen. Estimaattimallien opetuksessa käytetty koe-ala-aineisto jaettiin kunkin iteraation alussa kolmeen yhtä suureen joukkoon (opetus, validointi ja testaus), joista kaksi ensimmäistä osallistuivat kunkin mallin opetukseen ja piirrevalintaan. Mallien suorituskyyky arvioitiin testikoealojen avulla. Malleille laskettiin keskimääräinen suhteellinen RMS-virhe (RMSE%), suhteellinen harha (BIAS%) ja selitysaste (R^2) ajamalla mallinnusohjelmaa sata kertaa kullekinpuustotunnuslle. Näiden ajojen tuloksena saatiin myös puustotunnusaparhaiten selittävät satelliittikuvapiirteet ja niiden lukumäärät (mediaani). Mallinnusmenetelminä käytettiin yhden piilokerroksen täysin kytkettyä neuroverkkoa ja regressiopuumallia (Astola et al. 2019).

Tutkimuksen hakkuukoneaineistoa käyttävässä osiossa tavoitteena oli löytää vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Mikä lisähyöty hakkuukoneaineistosta on saatavissa puustotunnusten (runkotilavuus (V), pituus (H), pohjapinta-ala (G), keskiläpimitta (D)) estimoinnissa verrattuna perinteisen referenssiaineiston yksinomaiseen käyttöön?
- Miten eri aineistot tulisi yhdistää?

Hakkuukoneaineiston avohakkuuleimikoista valittiin kuviot, joiden hakkuun ajankohdaksi oli merkitty 18.5.2015 tai myöhemmin. Näille 278 kuviolle tehtiin visuaalinen tarkastus 31.8.2016 kuvatun Sentinel-2 kuvan avulla. Aineistosta poistettiin kuviot

- jotka eivät vastanneet satelliittikuvalla hakattua aluetta tai jotka liian pieniä tai kapeita satelliitin pikselikokoon nähden. Osa näistä kuvioista oli ajouria. (113 kpl)
- joille päätehakkuun sijasta tehty harvennus tai siemen/suojuspuuhakkuu (20 kpl)
- joille merkittyä päätehakkuuta ei ollut toteutettu (11 kpl)
- jotka satelliittikuvassa (31.8.2016) olivat pilven tai pilven varjon alla (10 kpl)

Mikäli visuaalisessa tulkinnassa oli epävarmuutta, tällöin kuvio poistettiin aineistosta. Näin pyrittiin varmistamaan jäljelle jääneiden hakkuukuvioiden oikeellisuus. Estimaattimallien opetukseen jäi tarkastuksen jälkeen yhteensä 124 kuviota. Näille kuvioille tehtiin vielä eroosio 15 m puskurilla, jotta kuvioihin ei laskettaisi kuuluvan satelliittikuvan pikseleitä, jotka ulottuvat hakkuun ulkopuolelle.

Puustotietojen mallien opetuksessa käytettiin Metsätehon kuvioille laskemia keskitunnuksia, sekä Arbonautin generoimia ympyräkoaloja. Kuvioille laskettuja keskitunnuksia käytettäessä laskettiin Sentinel-2 -kuvasta päätehakkuukuvioiden (joille siis tehty edellä mainittu eroosio) alueelta eri kanavien keskitunnukset (keskiarvo, mediaani ja keskihajonta) mallien selittäviksi muuttujiksi.

Ympyräkoaloista poistettiin ne, joiden keskipiste oli koealan säteen mittaa lähempänä (erodoidun) kuvion rajaa. Arbonautin tuottamat satunnaisesti kuvioille sijoitetut ympyräkoalat (200 000 kpl) olivat liian tiheässä satelliitin pikselikokoa (10 m) ajatellen. Tästä syystä koaloista valittiin

käyttöön osajoukko, joiden keskipisteiden keskinäinen etäisyys oli ≥ 5 m. Hakkuukonemalleja varten Sentinel-2 -kuvan 20 m:n kanavat muutettiin ensin 10 m:n pikseliresoluutioon (cubic convolution resampling). Satelliittikuvan reflektanssitieto poimittiin kuvaikkunoista, joiden keskipikseliin mallien opetukseen valittujen ympyräkoalojen keskipisteet sijoituivat. Poiminnassa käytettiin kolmea ikkunakokoa: 1 x 1 (vain koealan keskipisteen sisältävä kohdepikseli), 3 x 3 ja 5 x 5 pikseliä (kooltaan 10 x 10 m). Satelliittikuvan kanavien keskitunnukset laskettiin 3 x 3 ja 5 x 5 ikkunoille. Käyttämällä satelliittidatan ikkunoitua poimintaa haluttiin selvittää, onko kohdepikselin välittömässä läheisyydessä olevilla pikseleillä estimaattituloksia parantava vaikutus.

Koska päätehakkuuleimikoilta saatava referenssiaineisto edustaa vain varttuneita metsiköitä, yhdistettiin SMK:n koeala-aineisto ja hakkuukoneaineisto mallien opetusta varten. Alle 150 m³/ha opetusaineisto valittiin SMK:n koeala-aineistosta, ja 150 m³/ha ylittävä aineisto Metsätehon laskemista keskitunnuksista tai Arbonautin generoimasta koeala-aineistosta. Mallien suorituskyvyn arvioinnissa käytettiin yksinomaan SMK:n testiaineistoksi erotettuja koaloja (300 kpl). Yhteenvedo referenssiaineistojen eri yhdistelmistä on esitetty taulukossa 4.

Mallit opetettiin kokonaistunnuksille runkotilavuus V, keskiläpimitta D, puuston pituus H, pohjapinta-ala G käyttämällä täysin kytkettyä neuroverkkoa, jossa aineiston koosta ja selittävien muuttujien määrästä riippuen oli yhdestä yhdeksään piilokerrosta. Mallien opetettavien parametrien (verkon painokertoimet) lukumäärä vaihteli vastaavasti muutamista kymmenistä kymmeniin tuhansiin.

Taulukko 4. Koejärjestelyt hakkuukonemalleille

#	Test Setup	Training Data		Training Set Size	Test data (N = 300)
		V < 150 m ³ /ha	V ≥ 150 m ³ /ha		
1	Reference data(SMK field plot data)	SMK	SMK	438	SMK
2	Harvester Stand Summary Data	SMK	HAR-STAND	397	SMK
3	Simulated Field Plots from Harvester data	SMK	ARB-PLOTS	7420 -14567 1)	SMK

SMK = SMK Field plot data

HAR-STAND = Harvester stand summary data (Metsäteho)

ARB-PLOTS = Simulated Field Plots from Harvester data (Arbonaut)

1) Pienin koealamäärä kun koealan pinta-ala A = 1012 m², suurin, kun A = 253 m²

Tulokset ja tarkastelu

Hakkuukoneaineiston käyttö operatiivisen laserkeilausinventoinnin opetusaineistona

Hakkuukonekoalojen käyttöä operatiivisen laserkeilausinventoinnin opetusaineistona tutkittiin otantasimulaattorilla. Simulaattoritutkimukset tuottavat suuren määrän lukuarvoja. Tässä on esitetty vain päätuloksia ja tärkeimpänä pitämiämme huomioita. Lineaarisella regressiolla sovitettuna kokonaistunnusten mallin ja k-MSN:llä sovitettuna mallin välillä oli pieniä eroja, mutta pääosin tulokset olivat samansuuntaisia. Jatkossa esitetään vain k-MSN mallin tuloksia, koska Suomessa ollaan kiinnostuneita kokonaistunnusten lisäksi myös puulajeittaisista tunnuksista ja puulajeittaiset tunnuksot tuotettiin vain k-MSN menetelmällä.

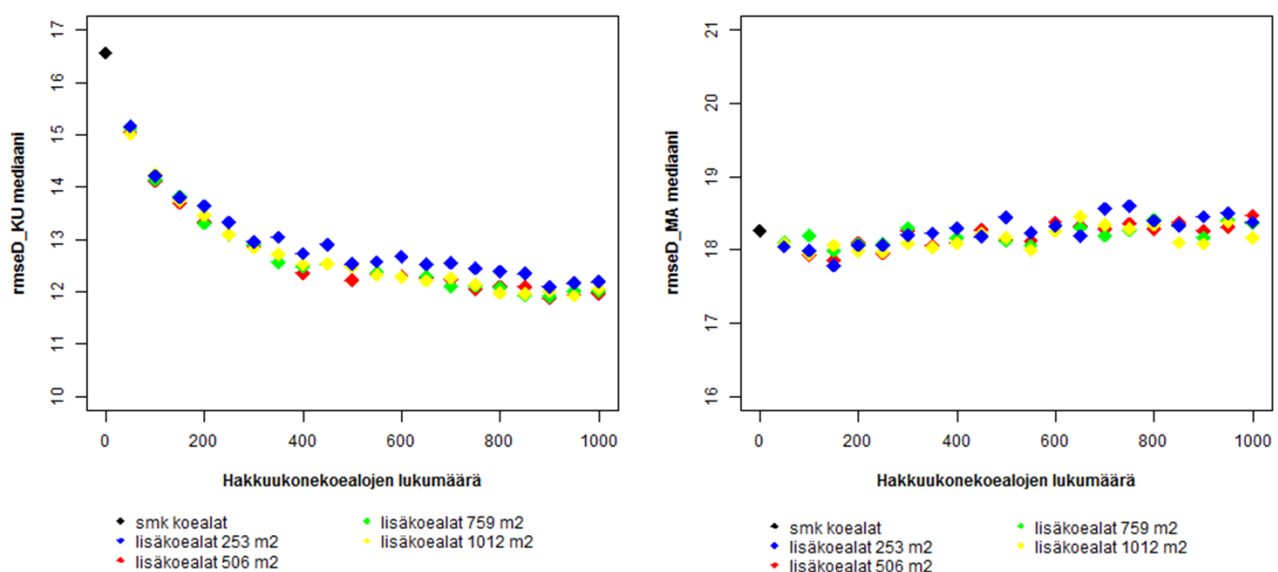
Kokonaistunnusten ennustevirheiden kuvaajat on esitetty liitteessä 1. Kuvaajissa on esitetty simulointikierrosten tulosten mediaaniarvot. Kokonaistunnusten osalta hakkuukonekoealojen käyttö pienensi ennustevirhettä lähes aina. Keskimääräinen parannus oli noin 1–2 prosenttiyksikköä RMSE:ssä. Poikkeuksena oli kuusivaltaisten leimikoiden pohjapinta-ala, jonka ennustevirhe kasvoi hakkuukonekoealoja käytettäessä.

Simuloimalla paranneltu sijaintitieto tuotti tarkemmat kokonaistunnusten ennusteet kuin alkuperäisen sijainnin käyttö. Selvimmin parannus näkyy kuusivaltaisten leimikoiden keskiläpimitassa, jossa parannellun sijaintitiedon käyttö tuotti noin prosenttiyksikön pienemmän virheen. Parannellun sijaintitiedon vaikutus näkyy myös siinä, että koealan koon merkitys pienenee.

Alkuperäistä sijaintitietoa käytettäessä koealan koko vaikutti ennustevirheisiin siten, että suurempi koealakoko pienensi ennustevirhettä. Selvimmin koealakoon merkitys näkyi kokonaistilavuudessa ja jonkin verran pohjapinta-alassa. Keskiläpimitaan ja keskipituuteen koealakoolla ei näyttänyt olevan juurikaan vaikutusta. Sijaintikorjattua tietoa käytettäessä koealan koko ei juurikaan vaikuttanut tuloksiin ja pienempi koealakoko tuotti jopa pienemmän ennustevirheet keskiläpimitalle ja keskipituudelle kuin suurempi koeala (liite 1, kuvat 5 ja 7).

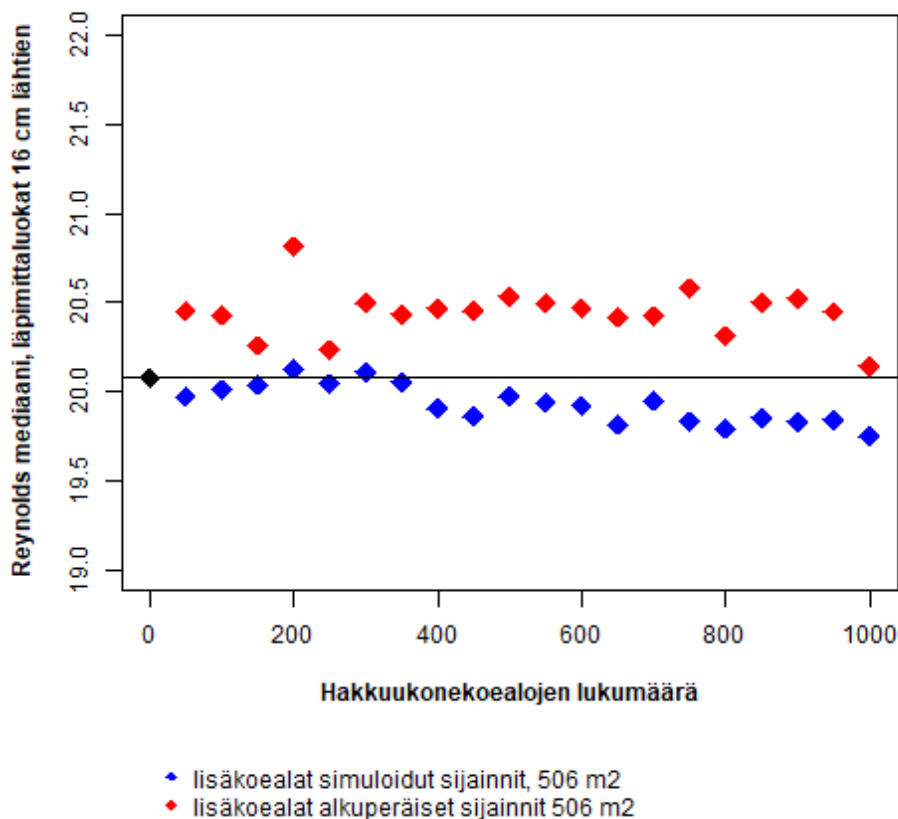
Pienikin hakkuukonekoealojen määrä mallinnusaineistossa pienensi ennustevirheitä. Vaikutus tasaantui nopeasti 200–600 koealan jälkeen, riippuen estimoitavasta tunnuksesta.

Pääpuulajin ja sivupuulajin ennustetarkkuuksien välillä oli merkittävä ero. Pääpuulajin ennustevirheet yleensä pienenevät, mutta sivupuulajien ennustevirheet saattoivat kasvaa, kun hakkuukonekoealoja lisättiin mallinnusaineistoon (kuva 3). Aineiston yleisimmän puulajin (kuusi) ennustevirheet pienenevät jopa enemmän kuin kokonaistunnusten keskivirheet. Keskiläpimitan ja keskipituuden ennustevirhe pieneni noin viisi prosenttiyksikköä ja tilavuuden ja pohjapinta-alan noin 10 prosenttiyksikköä. Pelkästään kuusivaltaisia leimikoita tarkasteltaessa ennustevirheet olivat huomattavasti pienempiä kuin kaikkia leimikoita tarkasteltaessa.



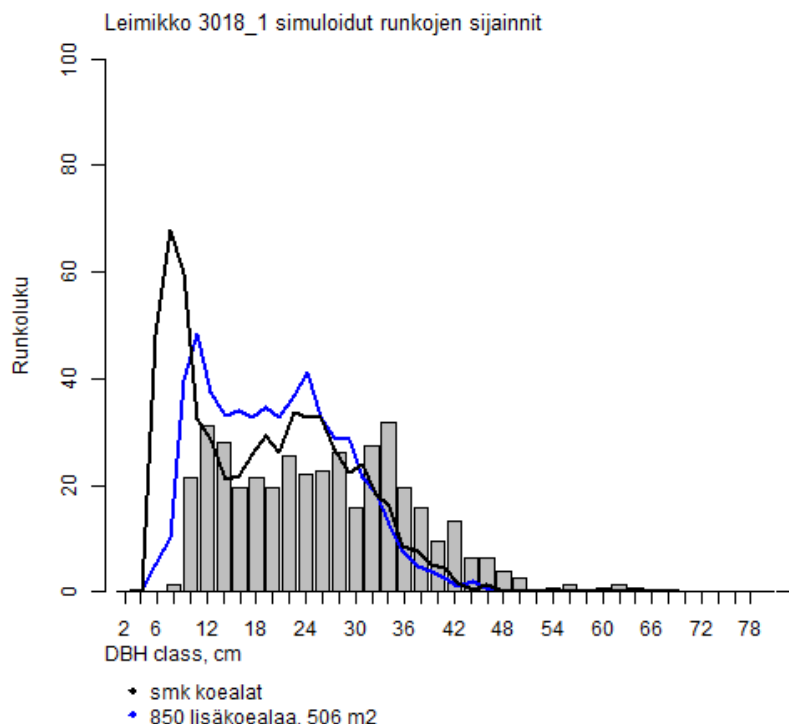
Kuva 3. Kuusen (vasen kuva) ja männyn (oikea kuva) keskiläpimitan RMSE:n mediaanit hakkuukonekoealoja käytettäessä. Käytettyyn hakkuukoneaineistoon on tehty sijaintitiedon parantelu. Kuusi on aineiston yleisin puulaji ja mänty on aineistossa sivupuulajina.

Jakaumia ennustettaessa sijaintitiedon parantelulla oli suuri merkitys. Alkuperäistä sijaintitietoa käytettäessä hakkuukonekoealojen käyttö huononsi ennustetun ja mitatun jakauman yhteensopivuutta Reynoldsin virheindeksin mukaan. Parannellulla sijaintitiedolla yhteensopivuus keskimäärin parani (kuva 4).



Kuva 4. Läpimittajakaumien ennustevirheen mediaani (Reynolds) simuloimalla parannellulla sijainnilla (sininen) ja alkuperäisellä sijainnilla (punainen). Vaakasuora viiva kuvaa pelkkiin maastokoealoihin perustuvan virheen tasoa.

Läpimittajakaumien tarkastelussa huomattiin, että hakkuukonekoealojen käyttö ei juurikaan parantanut jakaumaennustetta järeiden läpimittaluokkien osalta. Kuvassa 5 on esimerkki mitatusta läpimittajakaumasta ja pelkkiä maastokoealoja sekä hakkuukonekoealoja hyödyntävällä mallilla tuotetuista ennusteista. Kuvasta nähdään, että pelkkiin maastokoealoihin perustuva malli ennustaa huomattavan lukumäärän puita pieniin läpimittaluokkiin, mutta muuten ennustetuissa jakaumissa ei ole merkittävää eroa yhteensopivuudessa mitatun jakauman kanssa. Molemmat ennusteet aliarvioivat järeiden puiden lukumäärän.



Kuva 5. Esimerkkikuva läpimittajakaumaennusteesta. Pylväät kuvaavat hakkuukoneella mitattujen puiden läpimittoja, musta viiva on pelkkiin maastokoealoihin perustuva ennuste ja sininen viiva ennuste, kun hakkuukonekoealoja on käytetty mallissa.

Hakkuukonekoealojen esivalinta vähensi mallin laadinnassa käytettävien mallinnuskoealojen määrää noin $\frac{3}{4}$. Tästä huolimatta maastokoealoihin sovitettun mallin käyttö esivalinnassa ei pienentänyt ennustevirheitä vaan saattoi jopa lisätä harhaa. Esimerkiksi keskipituuden harha lisääntyi 0,5 prosenttiyksikköä. Syynä saattoi olla se, että käytetty esivalintamenetelmä johtaa harhaiseen otokseen johtuen maastokoealojen ja hakkuukonekoealojen hieman poikkeavasta mittaustavasta, toisin sanoen mitattavien runkojen valinnasta.

Paikannustarkkuuden vaikutus

Tulosten perusteella hakkuulaitteen paikannus parantaa yksittäisen puun sijaintitarkkuutta 2,93 metriä, päästen yksittäisen puun tasolla 7,86 metristä 4,93 metrin sijaintitarkkuuteen (Melkas & Riekkä 2017). Säteeltään yhdeksän metrin koealoille lasketun pohjapinta-alan poistuman RMSE tarkentui 35 prosentista 23 prosenttiin, kun koealalta hakatut puut paikannettiin hakkuukoneen sijasta laskennallisesti tarkennettuun hakkuulaitteen sijaintiin. Kun hakkuulaitteen paikannuksen avulla kerätyistä puutiedoista muodostettiin opetuskoealoja, niin aluepohjaisella menetelmällä ennustettujen leimikkokohtaisen pohjapinta-alan, runkoluvun, kokonaistilavuuden ja tukkitilavuuden RMSE tarkentui 4,1 – 18,1 prosenttiyksikköä kun koealojen pinta-ala oli 254 tai 509 neliometriä ja verrattavana olivat ennusteet, jotka perustuivat koealoihin, joissa yksittäiset puut oli paikannettu hakkuukoneen sijaintiin. Koealakoon ollessa 763 neliometriä tai enemmän ei paikannusmenetelmällä enää ollut vaikutusta puustotulkinnan tarkkuuteen. Hakkuukoneaineistoon muodostettujen koealojen käyttö yhdessä tavallisten maastokoealojen kanssa tuotti kaikilla puustotunnuksilla pienimmän RMSE:n, mutta ero pelkkien maastokoealojen avulla tuotettuun tarkimpaan ennusteeseen oli vähäinen. Tarkimmat pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteet saatiin joko hakkuukoneen sijaintia ja vähintään 763 neliometrin

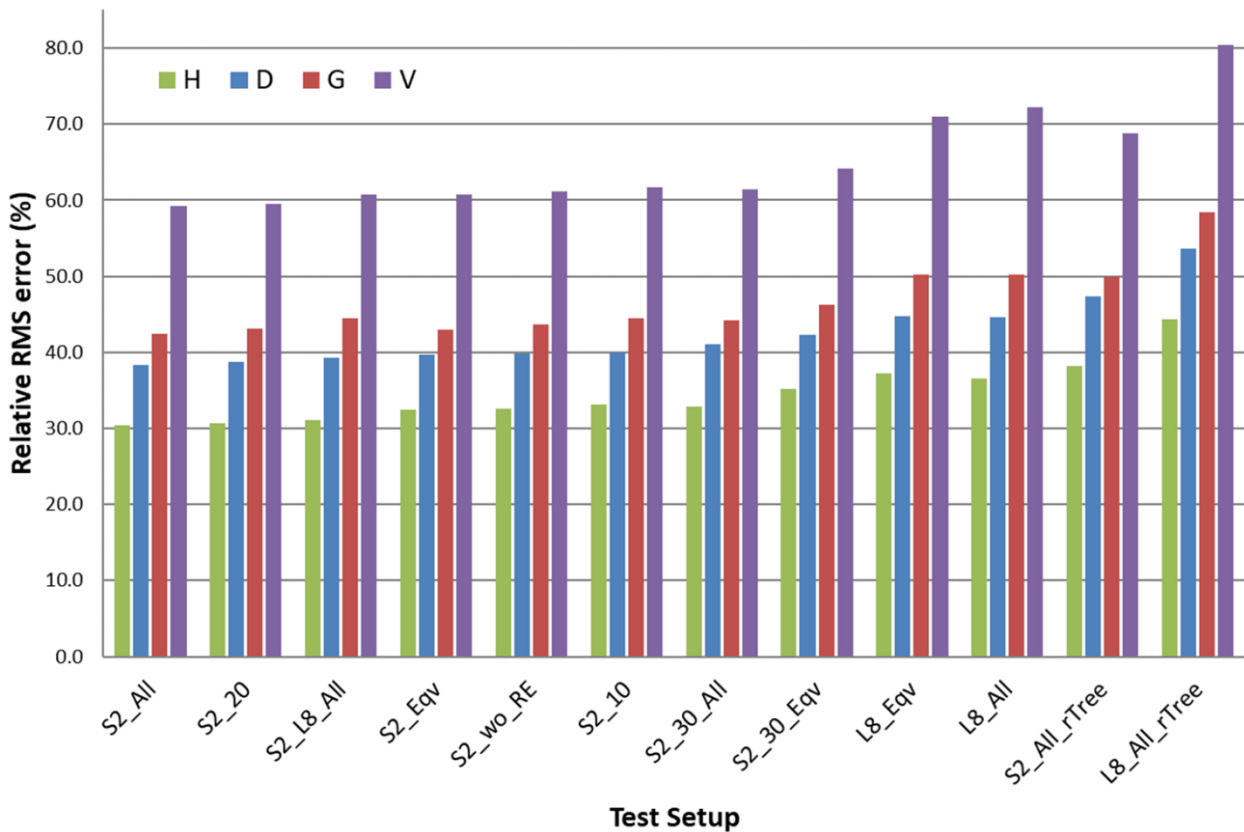
koealakokoa käyttämällä tai hakkuulaitteen sijaintia ja korkeintaan 509 neliömetrin koealakokoa käyttämällä. Keskipituuden ja keskiläpimitan osalta koealan koon ja paikannusmenetelmän vaikutukset olivat vähäiset. Hakkuukonekoealojen käyttö aluepohjaisen puustotulkinnan opetusaineistona tuotti yliarvioita pohjapinta-alan, runkoluvun, tilavuuden ja tukkitilavuuden ennusteisiin, mutta hakkuulaitteen paikannus pienensi ennusteiden yliarviota 254 ja 509 neliömetrin koealakoilla. (Saukkola 2017)

Hakkuukoneaineiston käyttö satelliittikuvatulkinnan opetusaineistona

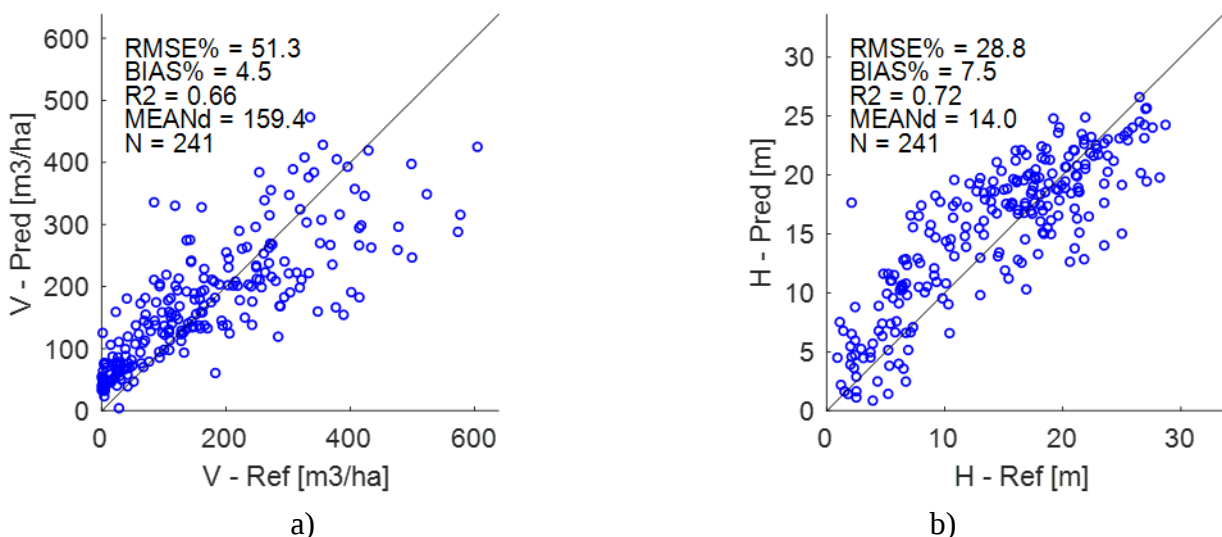
Sentinel-2 ja Landsat 8 -aineistojen vertailu puustotulkintaestimaattien lähtöaineistona

Satelliittiaineistojen vertailun tuloksena saatiin parhaat tulokset käyttäen Sentinel-2 satelliitin kaikkia kanavia mallin selittävinä muuttujina. Sadan mallinnuskierroksen keskiarvoina testikoealoille lasketut kokonaispuustotunnusten suhteelliset RMS-virheet olivat 38.4% rungon keskiläpimitalle, 42.5% pohjapinta-alalle, 30.4% puun pituudelle ja 59.3% runkotilavuudelle. Keskimääräiset tunnuksien Landsat 8 aineistolle olivat: RMSE% = 44.6%, 50.2%, 36.6% and 72.2% vastaavasti (Kuva 6). Sentinel-2 aineisto osoittautui paremmaksi myös käytettäessä vain molempien satelliittien vastaavia kanavia (ekvivalenttikanaavat) ja huonontamalla Sentinel-2 kuvan resoluutio Landsat 8 kuvaa vastaavaksi (30 m). Suhteellinen harha oli molemmilla aineistoilla hyvin pieni, ja oli 0.8% ja 1.2% Sentinel-2 ja Landsat 8 -instrumenteilla vastaavasti. Kokonaispuustotunnuksille Sentinel-2 mallien parhaiten selittävä muuttuja oli red-edge 1 -kanava (B05_RE1). Lyhyiden aallonpituuksien infrapunakanavat (B11_SWIR1 ja B12_SWIR2) sekä näkyvien aallonpituuksien vihreä kanava (B03_Green) olivat myös kokonaistunnuksen mallien parhaiten selittäviä muuttujia. Parhaiden mallien selittävien muuttujien mediaanilukumäärät olivat Sentinel-2 -malleilla 4-6 ja Landsat 8 -malleilla 4-5. Testikoealojen tyypilliset hajontakuviot Sentinel-2-satelliitin kokonaisrunkotilavuus- ja keskipituusestimaateille on esitetty Kuva 7.

Myös puulajikohtaisten Sentinel-2 -estimaattien tulokset olivat systemaattisesti parempia, kuin Landsat 8:lla, joskin kokonaistunnuksen vastaavia huonompia. Parhaat tulokset saatiin kuusen estimaateilla. Eri mallinnuskierrosten välillä esiintyneen suuren vaihtelun vuoksi ei selittävien muuttujien tärkeydestä eri puustotunnuksen estimointiin voitu tehdä vastaavia johtopäätöksiä kuin kokonaistunnuksilla. Sentinel-2 ja Landsat 8 -estimaattien keskimääräiset suhteelliset RMS-virheet ja selitysasteet kaikille estimoiduille puustotunnuksille on esitetty Liite_VTT Taulukko 1 ja Taulukko 2. Sentinel-2 ja Landsat 8 -satelliittien vertailu on täydellisemmin raportoitu julkaisussa (Astola et al. 2019).



Kuva 6. Kokonaispuustotunnusten H, D G ja V keskimääräiset suhteelliset RMS-virheet kahdelletoista koejärjestelylle (S2_All = Sentinel-2, kaikki kanavat; S2_20 = Sentinel-2, 20 m kanavat; S2_L8_All = S2 & L8 kaikki kanavat; S2_Eqv = S2, ekvivalenttikanaavat; S2_wo_RE = S2 ilman red-edge -kanavia; S2_10 = S2, 10 n kanavat; S2_30_All = S2, 30 m resoluutio, kaikki kanavat; S2_30_Eqv = S2, 30 m resoluutio, ekvivalenttikanaavat; L8_Eqv = L8, ekvivalenttikanaavat; L8_All = L8, kaikki kanavat; S2_All_rTree = Sentinel-2, kaikki kanavat, regressiopuumalli; L8_All_rTree = L8, kaikki kanavat, regressiopuumalli)



Kuva 7. Testikoealojen tyypilliset hajontakuviot ja virhetunnukset Sentinel-2 satelliittiaineiston estimaateille; a) kokonaisrunkotilavuus (V) ja b) keskipituus (H). Selittävinä muuttujina kaikki tutkimuksessa käytetyt kanavat.

Hakkuukoneaineisto satelliittikuvapohjaisten puustotulkintamallien opetusaineistona

Hakkuukoneaineistoilla opetettujen kokonaispuustotunnusten (V, H, D ja G) mallien tuloksissa ei havaittu suuria eroja pelkästään SMK:n koeala-aineistoon perustuvien mallien ja hakkuukoneaineistoa hyödyntävien mallien välillä, joskin Metsätehon kuviokohtaisilla keskitunnuksilla opetettujen runkotilavuus (V) ja pohjapinta-alamallien (G) harha oli muihin malleihin nähden verrattain suuri (Taulukko 5). Arbonautin generoimia koealoja hyödyntävät mallit tuottivat parhaat tulokset, kun testikoealoista valittiin runkotilavuudeltaan vain yli 150 m³/ha koealat. Hakkuukoneaineistoilla ja SMK:n koealoilla tuotettujen estimaattien hajontakuvioiden vertailu on esitetty Liite_VTT Kuva 1.

Taulukko 5. Eri referenssiaineistojen vertailu kokonaispuustotunnusten estimoinnissa. SMK = mallin opetuksessa käytetty vain SMK:n koeala-aineistoa; HAR_STAND = opetuksessa käytetty leimikkokuvioille hakkuukoneaineistosta laskettuja hehtaariohtaisia puustotunnuksia; ARB_PLOTS = opetuksessa käytetty hakkuukoealoille generoituja 709 m² koealoja. Kaikissa kolmessa tapauksessa alle 150 m³/ha opetusaineisto valittiin SMK:n koeala-aineistosta. Vertailutunnukset laskettu SMK:n testikoealoille (N = 300).

Total Stem Volume (V)			
RefDataSet	RMSE%	BIAS%	R ²
SMK	49.7	2.2	0.61
HAR_STAND	58.0	-27.0	0.55
ARB_PLOTS	50.5	2.3	0.59

Tree Height (H)			
RefDataSet	RMSE%	BIAS%	R ²
SMK	28.2	-5.4	0.68
HAR_STAND	27.9	-6.4	0.69
ARB_PLOTS	29.4	7.3	0.67

Stem Diameter (D)			
RefDataSet	RMSE%	BIAS%	R ²
SMK	35.8	-0.9	0.61
HAR_STAND	34.1	-1.4	0.64
ARB_PLOTS	34.8	6.0	0.65

Basal Area (G)			
RefDataSet	RMSE%	BIAS%	R ²
SMK	36.6	-2.8	0.59
HAR_STAND	44.0	-23.3	0.59
ARB_PLOTS	39.5	3.2	0.51

Arbonautin generoimista eri kokoisista koealoista 709 m²:n koealoilla saatiin parhaat tulokset. Satelliittidatan poiminnan ikkunakoon kasvatus yhdestä pikselistä 3 x 3 pikseliin paransi tuloksia jonkin verran. 5 x 5 pikselin ikkunalla poimitulla kuva-aineistolla tulokset jälleen heikkenivät hieman (ks. Liite_VTT Kuva 2). Satelliitin ikkunakokoa koskevat tulokset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia, sillä 5 x 5 pikselin ikkunalla poimittu aineisto kasvattaa mallin selitettävien muuttujien ja vastaavasti neuroverkon kertoimien määrää huomattavasti. Testeissä käytetty opetusaineiston määrä (luokkaa 10 000 opetusvektoria) ei ole käytännössä riittävä, kun mallin opetettavien parametrien määrä on jopa 50 000. Satelliittiaineiston ikkunoitua poimintaa koskevien

testien tulokset olivat siinä mielessä odotettu, että käytettäessä vain yhtä 10 m pikseliä paikkaepätarkkuuksien ja yksittäisten kaadettujen puiden vaikutus korostuu. Sama koskee pienimmän säteistä hakkuukoneaineistosta generoitua koealaa. Pinta-alaltaan 709 m² (generoitu) hakkuukoneala ja 3 x 3 pikselin poimintaikkuna vastaavat myös parhaiten kooltaan toisiaan. Hakkuukonekoealan pinta-alaa ja satelliittikuvan ikkunakokoa koskevat tulokset on esitetty Liite_VTT Kuva 2.

Johtopäätökset

Laserkeilaukseen perustuvassa puustotulkinnassa optimaalinen hakkuukonekoealan koko riippuu hakkuukoneessa käytetystä puiden paikannusmenetelmästä. Hakkuulaitteen paikannus tarkentaa koealan puustotunnusten määrittelyn luotettavuutta ja mahdollistaa pienempien koealojen käyttämisen kuin ilman hakkuulaitteen paikannusta.

Otantasimulaattorilla tehdyn tutkimuksen tulosten perusteella hakkuukonekoealojen lisääminen mallinnusaineistoon paransi keskimääräistä puuston keskitunnusten estimointitarkkuutta päätehakkuukuvioilla, kun maastototuutena käytettiin hakkuukonemittausta. Poikkeuksena oli metsikön tiheyttä kuvaava pohjapinta-ala, jonka ennustetarkkuus ei parantunut. Hakkuukoneaineiston puiden sijainnin korjaaminen simuloimalla sijaintivirhettä paransi estimointitarkkuutta. Läpimittajakaumien estimoinnissa sijaintitarkkuuden merkitys korostui. Sijaintivirheen simulointiin perustuvaa korjausta hyödyntäen päästiin jonkin verran referenssiä (pelkät maastokoealat) parempaan jakaumien ennustustarkkuuteen. Ilman korjausta hakkuukonekoealojen käyttö heikensi jakaumien ennustustarkkuutta.

Optimaalinen koealakoko ja koealojen määrä riippuu aineistosta. Tässä aineistossa otantasimulaattorilla saatujen tulosten perusteella optimaalinen koealakoko olisi noin 2 kertaa nykyinen maastokoeala (500 m²), mikäli käytettävissä on vain hakkuukoneen sijaintitieto, tai nykyinen maastokoealan koko, sillä edellytyksellä, että hakkuulaitteen sijaintitieto on korjattu esimerkiksi tässä esitetyllä korjausmenetelmällä. Koealojen määrän ei tarvitse olla kovin suuri; jo 200–600 hakkuukonekoealaa voi pienentää ennustevirheitä merkittävästi. Suositeltavaa kuitenkin on, että koealamäärä, koealojen koko ja ositus tehdään aina aluekohtaisesti.

Puulajien ennustetarkkuus on hakkuukonekoealoja hyödyntävässäkin menetelmässä tärkeä kysymys. Menetelmää voidaan hyödyntää siinä tilanteessa, että kohteet, joille ennuste tuotetaan, voidaan osittaa puulajin mukaan ennen ennusteen tuottamista ja ennustemalli laatia pääpuulajeittain. Muuten riskinä on alueen harvinaisempana esiintyvien puulajien ennusteiden heikentyminen.

Nyt testattu menetelmä soveltuu parhaiten tilanteeseen, jossa halutaan tarkentaa tietyn alueen päätehakkuuleimikoiden ennusteita. Edellytyksenä on, että kohdealueelta on saatavilla runsaasti paikannettua hakkuukoneaineistoa, joka edustaa puulajijakaumaltaan kohdealueen puulajijakaumaa ja että kohdealueen leimikot voidaan osittaa pääpuulajin suhteen. Tällaisessa tapauksessa prosessia voisi tehostaa leimikoiden mikrokuviointi ja mallinnuskoealojen sijoittaminen leimikkoo homogeenisempien mikrokuvioiden sisään. Hakkuukonekoealoihin perustuvan mallin laatimisessa kannattaa mallin validointi tehdä joko jakamalla leimikot testi- ja mallinnusleimikoihin kuten tässä tutkimuksessa tai käyttämällä ristiinvalidointimenetelmiä. Lopullinen ennustemalli kannattaa kuitenkin aina laatia hyödyntämällä kaikkea saatavilla olevaa havaintoaineistoa.

Yleisen, esimerkiksi Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedon tuottamisen menetelmäksi menetelmää ei voi vielä yksistään tämän tutkimuksen perusteella suositella. Yleisen puustotulkinnan laadullinen parannus nykytasosta käyttäen hakkuukonekoealoja tai päätehakkuukypsien kohteiden maastokoealojen korvaaminen hakkuukonekoealoilla vaatisi hakkuukonetiedossa olevan puun sijaintitiedon merkittävää parannusta.

Jos sivuutetaan hakkuukoneaineiston saatavuuteen liittyvät haasteet, niin puun sijaintitiedon tarkkuuden parantaminen on tärkein yksittäinen tekijä hakkuukoneaineiston soveltamisen edistämiseksi puustotulkinnassa. Hakkuukonekoealojen hyödyntäminen muiden kuin päätehakkuupuustojen estimoinnin apuaineistona vaatisi teknisiä edistysaskelia myös jäljelle jääneen puuston automaattisessa hakkuunaikaisessa mittaamisessa.

Sentinel-2 satelliittiaineistolla tehdyissä testeissä hakkuukoneaineistoa hyödyntävät mallit tuottivat yksinomaan koeala-aineistolla tuotettujen mallien kanssa vertailukelpoisia tuloksia. Hakkuukoneen tuottamaa aineistoa on täten mahdollista käyttää satelliittikaukokartoituksen yhteydessä muun referenssiaineiston lisänä. Hakkuukoneista systemaattisesti kerätyn tiedon etuna voidaan pitää sen ajantasaisuutta ja puustotiedon tarkkuutta. Estimaattien tarkkuuden voidaankin olettaa paranevan, kun hakkuukonetiedon sijaintitarkkuutta parannetaan. Aineiston tehokas hyödyntäminen vaatii kuitenkin sen laadun merkittävää parantamista, kuten virheellisten merkintöjen ja mallinnukseen kelpaamattomien kuvioiden poistamista. Hakkuukoneaineisto ei sovellu yksinään referenssiaineistoksi, koska nuorien metsiköiden opetusaineisto on tuotettava muista lähteistä.

Tehdyssä Sentinel-2 ja Landsat 8 -satelliittien vertailussa Sentinel-2 osoittautui paremmaksi. Sentinel-2 -aineiston käyttöä suositellaan ensisijaiseksi keskiresoluution optiseksi aineistoksi laajojen alueiden satelliittikaukokartoitukseen.

Lähteet (Hankkeen julkaisut lihavoitu)

Arbonaut Oy. (2015). Metsätieto 2020 –kehittämissuunnitelma, 55 p. WWW-sivu <<http://mmm.fi/>>. 27.1.2016.

Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., Kilpi, J. (2019). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. Remote Sensing of Environment 223(March):257-273. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.019

Frazer, G.W., Magnussen, S., Wulder M. A. & Niemann K. O. 2011. Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass. Remote Sensing of Environment 115 (2): 636-649. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.008>

Gobakken, T. & Næsset, E. (2009). Assessing effects of positioning errors and sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data. Canadian Journal of Forest Research 39 (5): 1036-1052. <https://doi.org/10.1139/X09-025>

Holopainen, M., Vastaranta, M., & Hyypä, J. (2014). Outlook for the next generation's precision forestry in Finland. *Forests*, 5(7), 1682-1694.

Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. (2015). Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisu 7: 1-152.

Laasasenaho, J. (1982). Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch [*Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula*, *Betula pubescens*]. Finnish Forest Research Institute.

Lindroos, O., Ringdahl, O., La Hera, P., Hohnloser, P. & Hellström, T. (2015). Estimating the Position of the Harvester Head – a Key Step towards the Precision Forestry of the Future. Croatian Journal of Forest Engineering 36 (2): 147-164.

Luoma, V., Saarinen, N., Wulder, M. A., White, J. C., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. (2017). Assessing Precision in Conventional Field Measurements of Individual Tree Attributes. *Forests* 8 (2). <http://dx.doi.org/10.3390/f8020038>

Melkas, T. & Hämäläinen, J. (2015). [Verkkodokumentti]. Hakkuukoneella kerätyn puustotiedon hyödyntäminen. Metsätehon raportti 237. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti_237_Hakkuukoneella_keratyn_puustotiedon_hyodyntaminen_tm_jh.pdf. [Viitattu 25.3.2019]

Melkas, T. & Riekk, K. (2017A). [Verkkodokumentti]. Hakkuualueen rajan muodostus hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 5/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2017_05_Hakkuualueen_raj_n_muo_dustus.pdf; [Viitattu 18.4.2019]

Melkas, T. & Riekk, K. (2017B). [Verkkodokumentti]. Puiden paikannustarkkuus hakkuukoneen tallennettuun sijaintiin ja kouran anturointiin perustuen. Metsätehon tulosalvosarja 9/2017. Saatavissa: http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja_2017_09_Puiden_paikannustarkkuus_hakkuukoneen_tallennettuun_sijaintiin.pdf; [Viitattu 18.4.2019]

Metsäteho Oy. (2017). [Verkkodokumentti]. Metsäkonetiedon omistusta, käyttöä ja käsittelyä koskevat periaatteet -suositus. 16.10.2017. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Metsakonetieto_Suositus_2017-10-16.pdf [Viitattu 18.4.2019]

Metsäteho Oy. (2015). Tehokas puuhuolto 2025. WWW-sivu <http://www.metsateho.fi/tehokas-puhuolto-2025-visio>. 27.1.2016

Rasinmäki, J. & Melkas, T. (2005) A method for estimating tree composition and volume using harvester data, Scandinavian Journal of Forest Research, 20:1, 85-95, DOI: [10.1080/02827580510008185](https://doi.org/10.1080/02827580510008185)

Peuhkurinen, J., Sirparanta, S., Melkas, T. & Riekk, K. (2019). [Verkkodokumentti]. Hakkuukonetiedosta simuloidut puun sijainnit kaukokartoituksen opetusaineistona. Metsätehon tulosalvosarja 5/2019.

Reynolds, M. R., Jr., Burk, T. E. & Huang, W. C. (1988). Goodness-of-fit tests and model selection procedures for diameter distribution models. Forest Science 34(2): 373-399.

Saukkola, A. (2017). Hakkuukoneen paikannetulla hakkuulaitteella kerätyn puutiedon hyödyntäminen lentolaserkeilaukseen perustuvan puustotulkinnan aputietona. Pro gradu. Metsätieteiden laitos, Helsingin yliopisto, 90 s.

Saukkola, A., Melkas, T., Riekk, K., Sirparanta, S., Peuhkurinen, J., Hyyppä, J. & Vastaranta, M. (2019). Predicting Forest Inventory Attributes Using Airborne Laser Scanning, Aerial Imagery, and Harvester Data. Remote Sensing. 11. 1-15. 10.3390/rs11070797.

Stendahl, J. & Dahlin, B. (2002). Possibilities for Harvester-based Forest Inventory in Thinnings. Scandinavian Journal of Forest Research 17 (6): 548-555. <http://dx.doi.org/10.1080/02827580260417206>