



Luonnonvara- ja
biotalous- ja
tutkimus 6/2019

Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyötyanalyysi

MetKu-hankkeen loppuraportti

Annika Kangas, Arto Haara, Markus Holopainen, Ville Luoma, Petteri
Packalen, Tuula Packalen, Roope Ruotsalainen & Ninni Saarinen

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 6/2019

Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyötyanalyysi

MetKu-hankkeen loppuraportti

Annika Kangas, Arto Haara, Markus Holopainen, Ville Luoma, Petteri Packalen,
Tuula Packalen, Roope Ruotsalainen & Ninni Saarinen

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2019

Viittausohje

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. 32 s.

Annika Kangas, ORCID ID <https://orcid.org/0000-002-8637-5668>



ISBN 978-952-326-706-0 (Painettu)

ISBN 978-952-326-707-7 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-707-7>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Annika Kangas, Arto Haara, Markus Holopainen, Ville Luoma, Petteri Packalen, Tuula Packalen, Roope Ruotsalainen & Ninni Saarinen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2019

Julkaisuvuosi: 2019

Kannen kuva: Annika Kangas

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Kangas, A.¹, Haara, A.¹, Holopainen, M.², Luoma, V.², Packalen, P.³, Packalen, T.², Ruotsalainen, R.³, Saarinen, N.²

¹Luonnonvarakeskus, Biotalous ja ympäristö

²Helsingin yliopisto, Metsätieteen laitos

³Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteen osasto

Julkisen metsävaratiedon kerääminen on merkittävä investointi metsätalouden edellytysten parantamiseen. Jotta investointi olisi kannattava, metsävaratiedolla saavutettavien hyötyjen täytyy olla kustannuksia suuremmat. Perinteinen kustannus-hyötyanalyysi metsävaratiedosta on haastava, koska investoinnin maksaa yhteiskunta (veronmaksajat), mutta yhteiskunnalle koitua hyöty on epäsuoraa (esimerkiksi verotulojen tai viennin arvon lisääntyminen). Suoraa hyötyä muodostuu useille eri toimijoille, ja kunkin toimijan ja kunkin käyttötilanteen tuottama hyöty täytyy arvioida erikseen.

Tämä raportti on yhteenveto maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa yhteistutkimushankkeessa Metsävaratiedon kustannushyötyanalyysi (MetKu) tehdyistä töistä. Hankkeessa tunnistettiin tahoja, jotka hyötyvät tiedosta ja kuvattiin mekanismeja, joilla hyöty realisoituu. Näin muodostuvien hyötyjen suuruusluokkaa arvioitiin tapauskohtaisesti tehdyillä laskelmilla. Laskelmissa ei pyritty kattavaan tiedon kokonaisarvoon. Jo pelkästään tapauskohtaiset laskelmat osoittavat kuitenkin kiistatonta, että metsävaratietoon on kannattavaa investoida.

Metsänomistajakunta hyötyy varttuneissa metsissä laserkeilaukseen perustuvasta metsävaratiedosta vuosittain jopa 210 miljoonaa euroa verrattuna siihen, että käytettävissä olisi satelliittikuvien luotettavuutta vastaava tieto, ja noin 60 miljoonaa vuodessa suhteessa perinteiseen maastotietoon, mikäli hyötyä tarkastellaan pelkästään kokonaistilavuuden luotettavuuden perusteella. Joidenkin muuttujien, kuten puulajiosuuksien suhteen laserkeilaus on kuitenkin maastoinventointia epätasemmalla tasolla, mikä vähentää nykyisenlaisen keilauksen tuottamaa hyötyä. Laserkeilaus toisaalta myös säästää kustannuksia tiedon keruussa, jolloin samansuuruisella yhteiskunnan investoinnilla voidaan kattaa vuosittain suurempi pinta-ala, mikä hyödyttää omistajia ajantasaisempaan tietona.

Hankkeessa tarkasteltiin myös, miten tiedonkeruun tapa vaikuttaa hyötyyn. Tätä varten verrattiin eri tavoin poimittujen opetuskoealojen tuottamaa hyötyä metsänomistajille. Tulosten mukaan koealojen poimintatapa (ositus, systemaattinen otos tai satunnainen otos) ei ollut kovin merkittävä, mutta koealojen määrän vaikutus on selkeä. Yhden lisäkoealan mittaamisesta saatava hyöty on 200 000 hehtaarin inventointialueella vielä 500 mitatun koealan jälkeen yli 3000 euroa. Tulosten perusteella myös tietojen tarkkuuden ja omistajan tulojen välillä on selkeä yhteys. Kokonaistilavuuden suhteellisen RMSE:n (keskineliövirheen neliöjuuri) pieneneminen yhdellä prosenttiyksiköllä kasvatti omistajan tuloa noin 4€/ha.

Lisäksi hankkeessa selvitettiin, millaisella frekvenssillä inventointeja kannattaa toteuttaa verrattuna tietojen päivittämiseen kasvumalleilla (ja tehdyillä toimenpiteillä). Tätä varten tarkasteltiin Evon tutkimusaineistossa metsänomistajan laskennallisia tuloja vuonna 2014 mitattujen, vuonna 2009 mitattujen ja vuoteen 2014 päivitettyjen, sekä vuonna 2007 mitattujen ja vuoteen 2014 päivitettyjen tietojen välillä. Tulosten mukaan jo viiden vuoden päivitys vähensi metsävaratietojen luotettavuutta siinä määrin, että uusi laserkeilaus oli omistajan kannalta kannattavampi kuin vanhojen metsävaratietojen päivitys. Metsävaratietojen näkökulmasta laserkeilausinventointien väliä ei siis ole suositeltavaa kasvattaa kansalliseen laserkeilausohjelmaan suunniteltua kuutta vuotta pidemmäksi.

Asiasanat: Hyöty, kustannus, hila, rasteri, laserkeilaus, ilmakuvapistepilvi, luotettavuus, ajantasaistus

Sisällys

1. Tausta	5
2. Aineisto.....	8
3. Menetelmät	9
3.1. Hyödyt tiedon tuottajan näkökulmasta	9
3.2. Hyötyjen suhteuttaminen valittuun vertailutasoon	9
4. Hyödyn tuottamisen mekanismit	11
4.1. Seulontatehtävät	11
4.1.1. Uusien asiakkaiden hankinta.....	11
4.1.2. Valvontatehtävät.....	12
4.2. Oman toiminnan suunnittelu.....	12
4.2.1. Toimenpiteiden ajoitus	12
4.2.2. Puunkorjuun suunnittelu	13
4.2.3. Pystyvarantojen ja varastojen hallinta	14
4.3. Transaktiot	14
4.3.1. Puukauppa	14
4.3.2. Puukaupan transaktiokustannukset.....	15
4.3.3. Kamera-rahoituksen hallinnointi	16
4.4. Tuotteen laadun paraneminen	16
5. Koealojen valinta metsävaratiedon keruussa	17
5.1. Koealojen valintastrategiat	17
5.1.1. ALS-otanta.....	17
5.1.2. LPM-otanta.....	17
5.1.3. Spatiaalisesti systemaattinen otanta	17
5.1.4. Satunnaisotanta	17
5.2. Puustotunnusten ennustaminen ja saavuttamatta jääneiden tulojen arviointi.....	17
5.3. Koealojen valinnan vaikutus metsänomistajan saamaan hyötyyn	18
6. Ajantasaistuksen ja uudelleen inventoinnin luotettavuus	22
7. Metsävaratiedon keruu tulevaisuudessa	28
8. Johtopäätökset.....	30

1. Tausta

Suomessa kerätään metsävaratietoa kahdella eri menetelmällä. Valtakunnan metsien inventointi (VMI) tuottaa vuosittain valtakunnallista ja maakunnittaista tilastotietoa metsävaroista ja niiden kehittämisestä (Tomppo ym. 2011). Tulokset perustuvat maastokoealoihin, joita mitataan noin 15 000 vuodessa. Tietoa kerätään yli sadasta muuttujasta. Satelliittikuvien avulla koealoittainen tieto voidaan yleistää kattavaksi paikkatiedoksi. Tämän ns. monilähdeinventoinnin tuottama rasterimuotoinen (jatkossa käytetään termiä hilamuotoinen) metsävarakartta tuotetaan noin kahden vuoden välein, ja se on vapaasti saatavissa netissä (esim. Tomppo 1993). Tämän lisäksi Suomen metsäkeskus (jatkossa Metsäkeskus) tuottaa laserkeilaukseen ja maastossa mitattuihin koealoihin perustuvaa hilamuotoista metsävaratietoa metsäoperaatioita ja niiden suunnittelua varten. Tiedonkeruu aloitettiin 2008, ja vuonna 2019 laserkeilaukseen perustuva metsävaratieto on saatavilla koko Suomesta. Maa-liskuusta 2018 alkaen myös tämä tieto on ollut vapaasti saatavissa.

Myös muissa pohjoismaissa tuotetaan vastaavaa metsävarakarttatietoa. Sekä Tanskassa että Ruotsissa VMI-koealoihin ja laserkeilaukseen perustuva metsävarakartta koko maasta on jo saatu valmiiksi, ja Norjassa työ on käynnissä (Kangas ym. 2018b). Tämän lisäksi Ruotsissa tuotetaan edelleen viiden vuoden välein myös Suomen monilähdeinventointikarttaa vastaava, satelliittikuviin perustuva kartta.

Tiedon arvo muodostuu tiedon tuottamasta lisäarvosta päätöksenteossa (esim. Kangas 2010). Jos esimerkiksi päätöksentekijä saa lisätiedon avulla puukaupasta 10 000 euron tulot, mutta ilman lisätietoa tulot olisivat 9 900 euroa, kyseisen lisätiedon arvo tässä päätöstilanteessa olisi 100 euroa. Jos tämän lisätiedon hinta olisi esimerkiksi 50 euroa, tällöin investointi tiedonkeruuseen tuottaisi 50 euron nettohyödyn. Tiedon kokonaisarvo on sitä korkeampi, mitä useampiin päätöksiin tieto tuo lisäarvoa. Suomen metsävaratietojen kokonaisarvo muodostuu siten kaikkien metsävaratietoa työssään käyttävien toimijoiden eri päätöstilanteissa yhteensä saamista hyödyistä, ja siitä syystä arvon kokonaisvaltainen arviointi on haastavaa (Coote ym. 2017).

Valtakunnallinen paikkatietoaineisto, joka kerätään yhteiskunnan rahoituksella, on merkittävä investointi tiedonkeruuseen, ja siksi investoinnin kustannukset täytyy pystyä perustelemaan hyvin. Paikkatiedon tuottamaa hyötyä onkin arvioitu useissa eri tutkimuksissa (esim. Coote ym. 2017, Forney ym. 2012, Sawyer ym. 2016). Metsävaratieto tuottaa hyötyä monella tasolla: tiedosta hyötyvät kaukokartoitus- ja metsävaratietoa tuottavat organisaatiot, tietoa suoraan hyödyntävät tahot, tietoon perustuvia palveluja käyttävät tahot sekä erilaisten ympäristö- ja kerrannaisvaikutusten kautta koko yhteiskunta (Kuva 1).

Coote ym. (2017) raportissa tiedon tuottamia hyötyjä arvioitiin sekä tarkastelemalla laadullisesti arvoketjun toimintaa että eräissä tapaustutkimuksissa tarkemmin varsinaisella kustannushyötyanalyysillä. Tavoitteena oli analysoida esimerkiksi metsäalan arvoketjua siten, että voidaan identifioida millä tavalla tieto tuottaa lisäarvoa ja miten se mahdollisesti muuttaa arvoketjun toimintaa. Tärkeimmät tavat, joilla metsävaratieto tuottaa lisäarvoa nähtiin tuossa tutkimuksessa seuraavasti:

1. Metsävaratiedonkeruun kustannukset alenevat merkittävästi laserkeilauksen avulla, jolloin metsänomistajien neuvontaan voidaan käyttää enemmän aikaa.
2. Yhteistyö metsäalan sisällä mahdollistaa tiedon käytön useampaan tarkoitukseen, ja siten tiedon kokonaisarvon kasvun.
3. Tarkempi tieto metsien arvosta rohkaisee metsänomistajia investoimaan enemmän metsätalouteen ja siten lisää metsien tuottavuutta.

4. Tarkempi tieto parantaa metsänhoitoa ja sitä kautta lisää metsien tuottavuutta.
5. Tarkempi tieto maaston vesitaloudesta vähentää puunkorjuun logistiikan kustannuksia.

Sawyer ym. (2016) arvioivat satelliittikuvien perusteella tuotetun hakkuukartan tuottamaa hyötyä Ruotsin metsätaloudelle. Hyödyt arvioitiin 16,1–21,6 miljoonaksi euroksi vuodessa. Hakkuukartan tuottaja sekä pääasiallinen käyttäjä on Swedish Forestry Agency (SFA), mutta myös muut valtion viirastot käyttävät saatua tietoa. Hakkuiden seurannan pääasiallinen tarkoitus on lainvalvonta, ja siten yhteiskunnalliset hyödyt muodostuvat lain noudattamisen parantumisesta. Metsänomistajille lain paremman noudattamisen arvioitiin tuottavan pitkän aikavälin hyötyä metsänhoidon laadun ja sitä kautta tuotoksen ja tulojen paranemisen kautta. Lisäksi arvioitiin yleisesti Ruotsin maineen ja kilpailukyvyyn metsätalousmaana paranevan. Yhteiskunnalle tiedon arvioitiin tuovan muun muassa parempaa elämän laatua, parempia puutuotteita sekä esimerkiksi lisää verotuloja.

Karttatiedon tuottaja	Metsävaratiedon tuottaja	Tiedon käyttäjä	Palvelun käyttäjä	Yhteiskunta
Terratec		Metsäteollisuus (puunosto, puunkorjuu, investointilaskelmat)	Sähkö- energia- ja teleyhtiöt	Paikallis- alue- ja kansantalous
Blom		Palveluntuottaja (Otso, MHY, muut)	Metsänomistajat (metsäsuunnitelma, työsuunnitelma)	Ympäristö
Arbonaut		Metsänomistaja (Metsään.fi)	Maankäytön suunnittelu (kaavoitus)	
	Metsäkeskus	Metsäkeskus (Lainvalvonta)	Luontomatkailu ja turismi	
	Luke	Tutkimus	Kansalaiset (marjasatokartta)	
		Ympäristöhallinto	Suojeluarvojen arviointi (Zonation)	
		MMM	KMO- ja AMO prosessit	
Kaukokartoitusdata	Metsävarakartta		Palvelu	Metsävarat

Kuva 1. Metsävaratiedosta hyötyvät tahot eri tasoilla: suorat käyttäjät, tietoihin perustuvien palveluiden käyttäjät sekä yhteiskunnalle tuotetut epäsuorat hyödyt.

Arvioidusta hyödystä 10 miljoonaa euroa on suoraan SFA:n saamaa hyötyä. Hyöty satelliittikuvien avulla tehtävästä hakkuiden seurannasta määritettiin arvioimalla, paljonko rahaa kuluisi vastaavan tiedon hankkimiseen maastoarvioinnilla tai ilmakuvilla. Vastaavan tiedon hankkiminen maastoarvioinnilla olisi vaatinut 137 henkilötyövuotta, joten laskennalliseksi hyödyksi arvioitiin heidän palkkakustannuksensa. Metsänomistajien arvioitiin hyötyvän aineistosta siten, että hakkuualat istutetaan

nopeammin. Jos käytännöt paranevat 10—20 %:lla maa-alasta, hyödyt ovat noin 3—6 miljoonaa euroa. Suurimmat muut hyödyt tulivat oletuksesta, että metsänomistajat tekevät enemmän harvennuksia samalla 10—20 %:lla maa-alasta.

Maa- ja metsätalousministeriön (MMM) rahoittamassa yhteistutkimushankkeessa Metsävaratiedon kustannushyötyanalyysi (MetKu) arvioitiin julkisilla varoilla kerättävän kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon (kuten Luken monilähdeinventointi- ja SMK:n Metsään.fi-aineistot) tuottamaa hyötyä eri osapuolille. Myös muita mahdollisia hyötyä tuottavia tietolähteitä kuten omavalvontatiedot on olemassa, mutta ne rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle. MetKu-hankkeessa tarkasteltiin vain metsävaratiedon välittömiä tuottajia ja käyttäjiä, eli verrattuna Sawyer ym. (2016) tutkimukseen, lisäarvoa tuottavien palvelujen sekä paikallistalouden hyödyt jätettiin tarkastelusta pois. Hankkeessa ei myöskään arvioitu metsävaratiedon vaikutusta metsänomistajien käyttäytymiseen, koska vaikutus on aiemmin tehdyissä tutkimuksissa (Niskanen 2003, 2004, Niemi 2018) arvioitu melko pieneksi. Metsävaratiedon tuottamaa yhteiskunnallista hyötyä ja sen muodostumismekanismeja on jo aiemmin arvioitu lähinnä laadullisesti (Kangas & Packalen 2018).

MetKu-hankkeessa ensimmäisenä osatavoitteena oli identifioida ja erilaisilla laskelmilla havainnollistaa mekanismeja, joilla hyötyä voi eri osapuolille muodostua. Esimerkiksi puulajiosuuksien ja kasvupaikan arviointivirheiden vaikutusta hyötyyn arvioitiin yksinkertaisilla laskelmilla. Tiedon kokonaisarvoa ei arvioitu.

Toisena osatavoitteena oli tarkastella, miten tiedonkeruujärjestelmän mahdollinen muuttaminen vaikuttaisi metsävaratiedon tuottamaan hyötyyn. Ensimmäisenä tehtävänä oli selvittää, miten kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon tuottama hyöty metsänomistajille vaihtelee analyysin opetusaineistoksi valittujen koealojen määrän ja valintatavan muuttuessa. Toisena tehtävänä oli selvittää, miten metsävaratiedon päivittäminen kasvumalleilla vaikuttaa tiedon luotettavuuteen, ja toisaalta tiedon perusteella laadittavaan metsäsuunnitelmaan ja sitä kautta metsänomistajan hyötyyn, jota kuvattiin tilan nettohyötyarvolla. Toisin sanoen tutkimuksessa analysoitiin, mikä on metsänomistajan hyöty, jos käytetään joko vanhaa, tarkasteluhetkeen päivitettyä inventointitietoa tai tehdään laserkeilaukseen tai ilmakuvapintamalliin perustuva uusi inventointi.

2. Aineisto

Hyötyanalyysin aineistona on käytetty Ähtäri-Virrat alueen kiinteäläisiä VMI-koealoja sekä alueelta vuonna 2013 kerättyä laserkeilaus- ja ilmakehu-aineistoja. Vertailukohtana on käytettävissä myös monilähdeinventoinnin tulkinta. Tarkemmat tiedot aineistoista ja tehdyistä mittauksista löytyvät esimerkiksi julkaisuista Tomppo ym. (2016) ja Tuominen ym. (2017).

Puulajitiedon virheiden merkittävyyden analysoimiseksi Ähtäri-Virrat aineistosta poimittiin yhteensä 1751 puustoista koealaa, joista löytyi maastossa mitatut tarkat tiedot, laserkeilaus- ja 2D ilmakehu-aineisto (2D+LASER), 2D-vääräväri-ilmakehu-aineisto (2D-ILMA), fotogrammetrinen 3D aineisto (3D2D-ILMA) sekä satelliittikuvat (SATKU). Analyysissa maastokoealojen tiedot oletettiin oikeiksi, ja virheelliset tiedot saatiin soveltamalla kullakin koealalla kunkin kaukokartoitusaineiston puulajitulkintatuloksia. Myös virheellisissä aineistoissa puuston kokonaistilavuus oletettiin virheettömäksi, eli tarkastelu rajattiin koskemaan vain puulajiosuuksien virhettä. Pääpuulajin oikeinluokitustodennäköisyys aineistossa vaihteli 73,5 % (SATKU) ja 82,0 % (2D+LASER) välillä.

Inventoinnin perustana olevien koealojen määrää tarkastelevassa osiossa koeala-aineisto jaettiin kahteen osaan: 1) harjoituskoealoihin (1038 kpl), joita käytettiin vaihtoehtoisissa koealavalintastrategioissa ja 2) validointikoealoihin (346 kpl), joille puulajikohtaiset summa- ja keskitunnukset ennustettiin harjoituskoealojen joukosta koealavalintastrategioiden perusteella valituilla koealoilla. T1 ja T2 kehitysluokat jätettiin pois tarkastelusta.

Lisäksi käytettiin Evolta eri aikoina kerättyjä laserkeilaus- ja ilmakehu-aineistoja sekä niihin liittyviä maastomittauksia. Maastomittaukset tehtiin 9,77 metrin ympyräkoealoille vuosina 2007, 2009 ja 2014. Koealojen määrät vaihtelivat vuosittain siten, että vuonna 2007 koealoja oli 230 kpl, vuonna 2009 373 kpl ja vuonna 2014 koealoja oli 91 kpl. Kaikkien vuosien maastomittauksissa koealojen kaikkien puista, joiden rinnankorkeusläpimitta oli yli 5 cm, mitattiin läpimitta ja pituus sekä määritettiin puulaji. Yksittäisten puiden tilavuudet laskettiin Laasasenahon (1982) tilavuusmalleilla ja koealakohdaiset tiedot saatiin yksittäisten puiden tiedoista.

Laserkeilausaineistot olivat vuosilta 2006, 2009 ja 2014. Vuoden 2009 laserkeilausaineiston keskimääräinen pistetiheys oli noin 10 havaintoa neliömetrille, kun vuoden 2006 aineiston pistetiheys oli 2.6 havaintoa/m² ja vuoden 2014 aineiston 0.7 havaintoa/m². Kaikki aineistot oli pääsääntöisesti kerätty lehdeelliseen aikaan touko-syyskuun aikana. Laserkeilausaineistojen lisäksi samoilta vuosilta oli myös ilmakehu-aineistot, jotka oli kerätty suurin piirtein samaan aikaan vuodesta kuin laserkeilausaineistot. Vuoden 2014 ilmakehut sisälsivät punaisen, vihreän, sinisen sekä lähi-infrapunaa aallonpituuden kanavat, kun taas vuosien 2006 ja 2009 ilmakevissa saatavina olivat punaisen, vihreän ja lähi-infrapunaa kanavat. Vuosien 2009 ja 2014 ilmakevistä oli muodostettu myös ilmakevuspintamallit, joita hyödynnettiin laserkeilausaineistojen lisäksi puustotunnusten ennustamisessa.

3. Menetelmät

3.1. Hyödyt tiedon tuottajan näkökulmasta

Metsäkeskuksen laserkeilauksen avulla tuottaman Metsään.fi aineiston välittömäksi hyödyksi voidaan laskea se, paljonko vastaavan tiedon hankkiminen maastomittauksin maksaisi. Kun laserkeilauksiin ja ilmakeihin perustuvaa inventointia tehdään noin 1,5 miljoonalla hehtaarilla vuosittain, vastaavan tiedon hankkiminen maastossa maksaisi noin 30 miljoonaa euroa vuosittain olettaen tiedon keruun kustannukseksi perinteisen kuvioittaisen arvioinnin hinta, noin 20 €/ha. Jos laserkeilaukseen ja ilmakeihin perustuvan inventoinnin hinnan arvioidaan olevan noin 5 €/ha, nettohyöty tiedon tuottajan tasolla on 22,5 miljoonaa euroa, olettaen että inventoinnista saatava tieto on käyttöominaisuuksiltaan täsmälleen vastaavaa kuin perinteisellä maastoarvioinnilla saatu. Tämä hyöty koostuu osittain kustannussäästöistä. Merkittävä osa laskennallisesta hyödystä muodostuu kuitenkin siitä, että laserkeilaus mahdollistaa paljon suuremman alueen inventoinnin kuin perinteisessä kuvioittaisessa arvioinnissa oli mahdollista kerätä.

3.2. Hyötyjen suhteuttaminen valittuun vertailutasoon

Metsävaratiedon tuottamaa hyötyä voidaan tarkastella suhteessa johonkin vertailutasoon. Tässä tutkimuksessa alimpana vertailutasona on käytetty joko täysin satunnaista tietoa tai monilähdeinventoinnin tuottaman tiedon tasoa. Oletus on, että kaikkiin tehtäviin on tarjolla aina vähintään monilähdeinventoinnin tasoista tietoa. Ylempänä vertailutasona voidaan käyttää perinteiseen tapaan maastossa tehdyn metsä- tai leimikkosuunnitelman tasoa. Silloin tarkastelun perusteena ovat maastotyön tuottamat kustannukset ja hyödyn taso (Kuva 2, oranssit nuolet).

Nykykaiseen kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon hyödyt voivat ilmetä esimerkiksi kustannussäästöinä suhteessa toimintaan vaadittavaan tiedon hankintaan. Mikäli kaukokartoitukseen perustuva metsävaratieto on laadultaan vertailutasoa vastaava, saavutetaan maksimaalinen kustannussäästö eli lisämittauksille tai tarkistuksille ei ole tarvetta. Mikäli vertailutasoa vastaavaan hyödyn tasoon pääsemiseksi tarvitaan maastossa tehtäviä lisämittauksia, kustannussäästöt ovat osittaisia (Kuva 2, siniset nuolet).

Metsävaratiedon tuottamat hyödyt voivat olla myös saatavia lisätuloja. Hyötyjen arvioiminen on mahdollista, jos päätöstilanteet voidaan mallintaa numeerisesti (Coote ym. 2017). Metsänomistajien metsävaratiedosta saamien hyötyjen analyysissä käytetään ns. cost-plus-loss menetelmää (esim. Eid ym. 2004, Kangas ym. 2018a). Menetelmässä kunkin tietolähteen optimitalanteessa tuottamia tuloja verrataan täydellisen tiedon vastaavassa tilanteessa tuottamiin tuloihin. Tällöin minkä tahansa metsävaratiedon keruujärjestelmän epävarmuudet näkyvät laskennallisina tappioina (tai saavuttamatta jäävinä tuloina) verrattuna täydellisiin tietoihin, ja metsävaratiedon parantamisen tuottamat hyödyt muodostuvat siitä että em. tappiot tai saavuttamatta jäävät tulot pienenevät.

Mikäli kaukokartoitukseen perustuva metsävaratieto on laadukkaampaa kuin vertailutason tieto, se tuottaa lisäarvoa verrattuna vertailutasoon, ja mikäli se on epäluotettavampaa kuin vertailutasona toimiva tieto, vertailutasona toimiva maastomittaus tuottaa suuremman hyödyn. Tällöin tiedon käyttäjä voi punnita, kannattaako tehdä maastossa lisämittauksia tai tarkistuksia, joilla päästään samaan tiedon tuottamaan hyötyyn kuin vertailutasolla (Kuva 1, vihreät nuolet). Investoimalla nykyistä laserkeilaukseen ja ilmakeiväukseen perustuvaa inventointia tarkempiin menetelmiin – eli hankkimalla vertailutasoa laadukkaampaa metsävaratietoa vaikkapa aiempaa tiheämmällä laserkeilauksella tai hyperspektrikeilauksilla – on mahdollista saada lisätuloja (Kuva 1, harmaat nuolet).



Kuva 2. Kaukokartoitukseen perustuvan metsävaratiedon suhde perinteiseen maastomittausarvioon tilanteessa, jossa kaukokartoitusperustainen metsävaratieto on epäluotettavampaa kuin maastossa kerätty tieto. Menetelmien väliset suhteet kuvassa eivät kuvaa menetelmien todellisia laatu- tai kustannuseroja.

4. Hyödyn tuottamisen mekanismit

Metsävaratieto tuottaa monenlaista hyötyä metsätalouden toimijoille. Kangas ja Packalen (2018) jakoivat pääasialliset hyödyntuottamismekanismit viiteen luokkaan: (1) seulonta, (2) oman toiminnan suunnittelu, (3) transaktiot, (4) tuotteen laadun parantuminen, sekä (5) epäsuorat vaikutukset. Seulonta tarkoittaa, että suuresta massasta metsiköitä tai metsänomistajia etsitään tietyt kriteerit täytäviä kohteita, kuten tuhoja, ilmoittamattomia hakkuita, virheellisin perustein tehtyjä Kemera-hakemuksia, potentiaalisia puunmyyjiä tai metsänhoitotöiden tilaajia. Näitä tiedon käyttötapauksia yhdistää se, että ensisijainen hyöty metsävaratiedosta saavutetaan oman toiminnan tehokkaalla kohdentamisella. Seulonnassa ei useinkaan tavoitella kustannussäästöjä, mutta sen sijaan on mahdollista esimerkiksi saada lisää liikevaihtoa, jos seulonta lisää transaktioita.

Oman toiminnan suunnittelussa metsävaratiedolla haetaan ensisijaisesti kustannussäästöjä. Oman toiminnan suunnittelua ovat esimerkiksi puunkorjuun, pystyvarantojen ja varastojen suunnittelu. Metsänomistajalle oman toiminnan suunnittelu tarkoittaa hakkuiden ajoittamista ja kohdentamista, ja metsävaratiedolla pyritään saamaan metsistä paremmat tulot, kuin mitä olisi ilman metsävaratietoa saatu (eli välttää tulojen menetyksiä suhteessa optimaalisiin tuloihin). Kuviotasolla metsävaratieto voi tuottaa kustannussäästöjä erilaisten maastotarkastusten ja -mittausten ajansäästönä. Organisaatiotasolla metsävaratieto voi auttaa resurssien (koneiden, työntekijöiden, työajan, pääoman) allokoinnissa tehokkaammin, ja tuottaa kustannussäästöjä sitä kautta.

Puu- ja tilakaupassa metsävaratiedon voidaan nähdä vähentävän transaktiokustannuksia. Transaktiokustannuksia syntyy esimerkiksi siitä, että kaupan kohteena oleva tila tai leimikko tarkistetaan maastossa ennen tarjouksen jättämistä. Toisaalta transaktiokustannuksia syntyy myös siitä, että väärä tai väärissä paikoissa olevia puutavaralajeja vaihdetaan muiden toimijoiden kanssa tai myydään muille toimijoille. Transaktioissa, joissa on kaksi osapuolta, metsävaratieto vaikuttaa tulojen oikeudenmukaiseen jakautumiseen, eli siihen että kumpikaan osapuoli ei pääse hyötymään toisen osapuolen virheellisistä tiedoista.

Puun jalostusarvon lisääminen tuottaa yksityistaloudellista hyötyä teollisuuden osakkeenomistajille. Metsävaratieto voi esimerkiksi edesauttaa puun katkontaa asiakkaille räätälöidysti, jolloin tuotteesta saadaan parempi hinta. Myös palveluita, kuten metsäsuunnitelmia tai hoitotöitä, voidaan parantaa metsävaratiedon avulla, jolloin asiakkaat kenties olisivat valmiit maksamaan tuotteesta enemmän.

Metsävaratieto tuottaa myös monenlaista epäsuoraa, yhteiskunnallista hyötyä. Jalostusarvon lisääntyminen tuottaa yhteiskunnallista hyötyä yhtiöiden maksamien verojen ja vientitulojen kautta. Toiminnan tehostuminen voidaan nähdä yhteiskunnallisena hyötynä silloin, jos tehostumisen voidaan ajatella parantavan Suomen metsäteollisuuden kilpailukykyä tai metsäpalveluyritysten liikevaihtoa ja sitä kautta lisäävän työpaikkoja, vientituloja ja lopulta verotuloja. Lisäksi kansantaloudellista hyötyä muodostuu siitä, jos metsänomistajat metsävaratiedon parantumisen ja sitä kautta asiakaspalvelun parantumisen takia tehostavat myös metsänhoitoaan, eli muuttavat käyttäytymistään. Tässä työssä epäsuorat hyödyt on rajattu analyysin ulkopuolelle.

4.1. Seulontatehtävät

4.1.1. Uusien asiakkaiden hankinta

Uusien asiakkaiden hankinnassa metsävaratiedon hyödyt perustuvat siihen, että asiakashankintaa kohdennetaan tehokkaasti eli puunhankintaan liittyvät tehtävät keskitetään omistajiin, joilla on kattavaa puustoa, ja jätetään vähemmälle huomiolle omistajat, jotka ovat hakkuumahdollisuutensa

käyttäneet. Vastaavasti hoitotöiden markkinointi tehostuu, kun se kohdennetaan metsänomistajiin, joilla on hoitoa tarvitsevia kohteita. Laskennallinen hyöty muodostuu siitä, että samassa ajassa voidaan hankkia suurempi puumäärä / kohdemäärä. Lisäksi hyötyä muodostuu asiakassuhteen muodostumisesta sinänsä. Joissain organisaatioissa tarkemman metsävaratiedon arvioitiin lisäävän liikevaihtoa (eli transaktioiden määrä kasvaa) ja sitä kautta muodostavan hyötyä. Lisääntyvän liikevaihdon numeerinen arvioiminen ei ole tämän hankkeen puitteissa mahdollista.

4.1.2. Valvontatehtävät

Lainvalvonnassa maastossa tehtävien tarkastusten tehokas kohdentaminen lisää todennäköisyyttä, että rikkomukset havaitaan. Ilmoittamattomien hakkuiden löytymisen voidaan olettaa vaikuttavan myös siihen, miten rikkomuksia ja niistä kiinni jäämistä vältetään hoitamalla hakkuiden jälkeiset uudistamisvelvoitteet (Sawyer ym. 2016). Metsätuholain valvonnassa tehokas kohdentaminen puolestaan voi nostaa tuhokohteiden löytymisen todennäköisyyttä. Se puolestaan voi pienentää leviämiskä, ja ehkäistä sitä kautta taloudellisia menetyksiä.

Kemera-kohteista tarkastetaan maastossa työläjeittäin noin 5 %. Nuoren metsän hoidon ja taimikon varhaisoidon tarkistuskohteista valitaan noin 1 % otannalla ja loput harkinnalla. Harkinta perustuu metsävaratietoon ja omistajan aiempien kohteiden tuntemukseen. Kohteista tarkastetaan pieni osuus, ja niistä hylätään tarkastuksen jälkeen suuri osuus (37 % harkinnanvaraisesti valituista ja 12 % satunnaisesta otoksesta ks. Kaihlanen 2017). Vaikka metsävaratietojen perusteella virheellisin perusteiden tehdyt hakemukset löytyvät kolme kertaa todennäköisemmin kuin satunnaisesti, rajallinen tarkastusten määrä tarkoittaa, että rahoitusehtoja täyttämättömiä kohteita silti rahoitetaan: 95 % kohteista jää tarkastamatta. Metsävaratiedon hyöty tulee suoraan siitä, että useampia virheellisin perusteiden tehtyjä hakemuksia jää kiinni, eikä etuuksia jaeta väärin perusteiden. Tämä vähentänee viiveellä myös virheellisten hakemusten määrää, ja sitä kautta toimistossa tehdyn tarkastustyön määrää. Metsävaratiedon perusteella ei kuitenkaan saada kiinni kohteita, joissa työ on tekemättä tai työ ei täytä sille asetettuja vaatimuksia esim. jäävän puuston määrän osalta.

Jos metsävaratietoa ei olisi käytössä, koko 5 % tarkastettavia kohteita valittaisiin satunnaisesti otannalla. Vuonna 2016 nuoren metsän hoitoon ja taimikoiden varhaishoitoon myönnettiin tukea 142 923 hehtaarille, josta 41 500 taimikonhoitoon, 72 900 nuoren metsän kunnostukseen ja 28 500 pienpuun korjuuseen. Jos nuoren metsän kunnostushakemuksista keskimäärin 25 % on virheellisiä, se tarkoittaisi noin 18 225 hehtaaria, ja tuki tälle alueelle on 4,2 miljoonaa. Ilman metsävaratietoja kaikki tarkastukset tehtäisiin satunnaisilla tarkastuksilla, jolloin niissä virheellisin perusteiden tehtyjen hakemusten havaitsemisen todennäköisyys olisi sama kuin niiden osuus koko populaatiossa eli 25 % joka tarkoittaa noin 210 000 euroa. Kun tarkastuksista 4 % kohdennetaan metsävaratietojen perusteella, jolloin hylätään pahimmillaan jopa 50 %, saadaan kiinni virheellisiä hakemuksia parhaimmillaan noin 335 000 euron edestä, ja 1 % satunnaisissa tarkastuksissa 12 % joka tekee noin 21 000. Metsävaratiedosta saadaan siis kustannussäästöä tällä hetkellä noin 150 000 vuodessa nuoren metsän hoidosta, ja vastaavin perusteiden myös muista työläjeistä.

4.2. Oman toiminnan suunnittelu

4.2.1. Toimenpiteiden ajoitus

Metsänomistajan (yksityinen, julkinen tai yhtiö) päätöksenteko, eli toimenpiteiden suunnittelu ja ajoitus, on perinteisin ja siksi eniten tutkittu metsävaratiedon käyttökohde. Viimeisissä tutkimuksissa on arvioitu, että metsänomistajan päätöksenteossa kokonaistilavuuden suhteellisen RMSE:n (keskineliövirheen neliöjuuren) eli tiedon luotettavuuden parantuminen yhdellä %-yksiköllä lisää met-

sänomistajan odotettavissa olevia tuloja 3,9–4,4 €/ha/10v (Kangas ym. 2018a, Ruotsalainen ym. 2018). Mikäli tämä suhteutetaan puuntuotannossa olevaan varttuneitten metsien pinta-alaan (metsämaan pinta-ala josta on vähennetty taimikot ja aukea ala eli 15,035 miljoonaa hehtaaria), yhden RMSE%-n parannus tuottaa koko metsänomistajakunnalle noin 6,0 miljoonan euron hyödyn vuosittain ($15,035 \text{ M} \cdot (4,0\text{€}/10\text{v}) = 6,014 \text{ M}$). Suhteessa siihen, että metsäsuunnittelua varten ei kerättäisi erikseen tietoja, vaan käytettävissä olisi esimerkiksi satelliittikuviin perustuva metsävaratieto, metsänomistajakunta on saavuttanut merkittäviä hyötyjä.

Metsävaratiedon kokonaistilavuuden keskivirhe oli perinteisessä kuvioittaisessa arvioinnissa noin 25 % (Haara & Korhonen 2004). Laserkeilauksessa on kuviotasolla päästy noin 15 % kokonaistilavuuden luotettavuustasoon (Wallenius ym. 2012). Siten nykyisen kaltainen metsävaratieto on tuottanut metsänomistajille noin 60 miljoonan hyödyn vuosittain $((25-15) \cdot 6 \text{ M})$. Visuaaliseen ilmakuvatulkintaan ja fotogrammetrisiin mittauksiin perustuva metsävaratiedon keruu tuottaa noin 35 %:n keskivirheen (Uuttera ym. 2006). Tätä menetelmää käytetään metsäsuunnittelussa vielä laajasti muissa pohjoismaissa (Kangas ym. 2018b). Siihen verrattuna nykyisen kaltainen metsävaratieto on tuottanut metsänomistajille noin 120 miljoonan hyödyn vuosittain $((35-15) \cdot 6 \text{ M})$. Satelliittikuvilta saatavan tiedon virhe on (tarkastelumittakaavasta riippuen) vaihdellut välillä 40 %–80 % (esim. Tomppo ym. 2008, Tuominen ym. 2017), joten satelliittikuvatietoon pohjautuvaan suunnitteluun verrattuna hyötyä on saavutettu vielä enemmän, eli noin 210 miljoonaa vuosittain $((50-15) \cdot 6 \text{ M})$.

Aiemmin mainittu tarkastelu sisältää kaikkien puustotunnusten virheiden vaikutuksen, eli esimerkiksi pohjapinta-alan, pituuden, läpimitan ja puulajin virheet on huomioitu. Hyötyjä on kuitenkin mahdollista tarkastella myös muuttujakohtaisesti. Tällaista analyysiä vaikeuttaa se, että eri muuttujien virheillä voi olla yhteisvaikutuksia, eli yhden muuttujan virhe voi tietyissä tilanteissa kompensoida toisen muuttujan virhettä, jolloin kahden virheen vaikutus on vähäisempi kuin yhden tai toisin päin. Puulajiosuudet sekä kasvupaikka ovat kaukokartoituspohjaisessa metsävaratiedossa haasteelliset. Puulaji osoittautuikin metsänomistajan näkökulmasta erityisen tärkeäksi: vaikka kaikki muut tiedot ovat oikein, väärä pääpuulaji 10–20%:ssa metsiköistä vaikuttaa omistajan saamaan hyötyyn suunnitteen saman verran kuin kokonaistilavuuden RMSE%-n lisääntyminen kymmenellä %-yksiköllä (Haara ym. 2018 b). Pääpuulajin tarkastaminen maastossa on täten omistajalle kannattava lisämittaus.

Toisaalta laserkeilaukseen ja vääräväri-ilmakuvaan perustuva tieto tuottaa puulajitulkinnassa noin 1,5 €/ha/v hyödyn verrattuna siihen, että käytettäisiin satelliittikuvan tuottamia puulajitietoja. Suhteutettuna varttuneiden metsien pinta-alaan se tarkoittaa vuosittain noin 22 miljoonan hyötyä pelkästään puulajitiedon parantumisesta satelliittikuvan tasosta laserkeilauksen ja ilmakuvan tasolle.

4.2.2. Puunkorjuun suunnittelu

Metsikkötasolla oikea, maaperän pysyviin ominaisuuksiin perustuva (pikselipohjainen) korjuuolosuhdekartta mahdollistaa puunkorjuussa kustannussäästöjä. Säästöjä muodostuu, jos korjuuolosuhdetietoja ei tarvitse erikseen tarkastaa maastossa tai maastotarkastuksista säästyy aikaa. Toisaalta säästöjä voi muodostua siitä, että koneita ei lähetetä turhaan esimerkiksi lumi- tai sadetilanteen takia korjuukelvottomaksi muuttuneelle kohteelle. Siten sade- ja lumimääriin ja muihin säätietoihin perustuvat dynaamiset arviot korjuukelpoisuudesta voisivat tuottaa puunkorjuun ohjaajille tulevaisuudessa merkittävää lisäarvoa. Koska korjuuolosuhdekarttojen luotettavuudesta ei vielä ole olemassa kovin paljon kokemuksia eikä julkaistuja luotettavuustietoja, niiden tuottamaa hyötyä ei ole vielä mahdollista numeerisesti arvioida.

Suurin lisäarvo, joka paremmasta korjuuolosuhdetiedosta on saatavissa, on korjuun kausivaihtelun tasoittamisessa organisaatiotasolla. Jos kausivaihtelu pystytään tasoittamaan täysin, tiedolla voidaan säästää arvioiden mukaan jopa 500 koneen tarve puunkorjuussa. Jos yksittäisen koneen hinta on n.

350 000 euroa, se tarkoittaisi 175 M säästöjä. Yksittäiselle puunkorjuuyrittäjälle / kuskille kausivaih-
telun tasoittaminen merkitsee koneiden käyttöasteiden kasvua. Esimerkiksi koneen vuotuisen käyt-
töajan kasvu neljästä viiteen kuukauteen laskee koneen kustannuksia käyttötuntia kohden lähes
10 %.

4.2.3. Pystyvarantojen ja varastojen hallinta

Yhtiöiden omat varanto- ja varastostrategiat ovat liikesalaisuuden piirissä. Tässä yhteenvedossa käy-
tetään oletusta kuuden kuukauden pystyvarannosta ja kuukauden varastosta. Jotkut toimijoista pitä-
vät tätä pienempiä, ja jotkut suurempia varastoja/varantoja.

Tarkat puulaji- ja puutavaralajitiedot leimikoista mahdollistaisivat sen, että varastoja voitaisiin pie-
nentää. Virheet kasvattavat varastoja silloin, jos leimikoilta tulee ennakoitua enemmän puutavarala-
jia (esimerkiksi koivukuitua), jota on jo riittävästi varastossa. Liian isot varastot aiheuttavat pääoma-
kustannuksia. Kustannuksia voi tulla myös siitä, että tienvarsi- tai terminaalivearastossa syntyy laatu-
vaurioita. Pystyvarannon pienentäminen tuottaa kustannussäästöjä vain silloin, jos pystyvuista mak-
setaan ennakkomaksu.

Koko raakapuun käyttö on vuodessa noin 70 miljoonaa kuutiota (2017 69,7 M kuutiota
<https://stat.luke.fi/metsateollisuuden-puun-kaytto>). Silloin koko alan pystyvarantojen tarve olisi koko
ajan noin 35 miljoonaa kuutiota. Jos ennakkomaksu olisi 10 %, ja puun keskihinta 30 €, pääomakus-
tannuksia maksettaisiin noin 105 miljoonasta eurosta kunakin päivänä. Nykyisellä korkotasolla (ole-
tus 1 %) kokonaiskustannus vuositasolla olisi noin 1,05 M. Jos ennakkomaksu olisi 50 % kauppahin-
nasta ja korko 3 %, pääomakulut nousisivat yli 15 miljoonaan. Korkotason noustessa ennakkomak-
suistakin voi siten koitua merkittäviä pääomakustannuksia. Toisaalta nousevien hintojen tilanteessa
suuri pystyvaranto voi tuottaa myös hyötyä (laskevien hintojen tilanteessa kustannuksia), kun puut
on ostettu halvemmalla (kalliimmalla) kuin ne käyttöhetkellä hankittuna olisivat.

Tienvarsi- tai terminaalivearastojen määrä olisi vastaavilla oletuksilla noin 5,8 miljoonaa kuutiota.
Puuston määrästä ja laadusta on korjuun jälkeen erittäin tarkat tiedot hakkuukoneiden ansiosta.
Pääomakustannuksia koituu, koska tämä puutavara on kokonaan maksettu myyjälle. Lisäksi varaston
arvoon ovat sitoutuneet myös korjuukustannukset, metsäkuljetuskustannukset (tienvarsivarasto)
sekä osa kaukokuljetuskustannuksista (terminaali). Vuonna 2014 korjuukustannukset olivat Metsäte-
hon mukaan keskimäärin 10,94 €/m³, yleiskustannus noin 3,22 €/m³ ja kaukokuljetuskustannus noin
8,4 €/m³. Pääomakustannuksia maksettaisiin siten noin 305 M eurosta kullakin hetkellä, eli 1 %:n
korkotasolla kustannus voisi olla noin 3 M vuodessa.

Vaikka metsävaratieto olisi täydellistä, varastoista ei ole mahdollista kokonaan luopua. Jos varas-
tot/varannot vedetään liian pieniksi, tulee riski lisäkustannuksista kun tiettyä puutavaralajia joudu-
taan hankkimaan kauempaa, kalliimmalla hinnalla tai kiireellä esimerkiksi tieolosuhteiden muuttumi-
sen takia. Esimerkiksi Kauppalehti uutisoi, että UPM on menettänyt 30 miljoonaa varastojen liian
pienen koon vuoksi syksy-talvikorjuun aikana 2017–2018 (Kauppalehti 2018). Pahin riski on se, että
tuotanto joudutaan keskeyttämään raaka-aineen puutteen takia.

4.3. Transaktiot

4.3.1. Puukauppa

Koska puulajitieto ei ole kaukokartoitukseen perustuvissa tiedoissa yhtä luotettava kuin perinteisessä
maastosuunnitelmassa, puukauppaan sisältyy hintariski: jos metsänomistaja ei ole varma mikä on
myytävän kohteen pääpuulaji, puutavaralajijakauma sekä puutavaran laatu, on mahdotonta olla

varma että valitsee parhaan tarjouksen. Pelkästään sähköisesti kauppa tekevä metsänomistaja voi siis saada kohteesta huomomman hinnan kuin saisi tarkastamalla kohteen tiedot maastossa. Jos esimerkiksi metsävaratietojen perusteella kohteen pääpuulaji on kuusi, omistaja helposti valitsee tarjouksen, jossa nimenomaan kuusesta tarjotaan paras hinta. Tämä johtaa menetettyihin tuloihin, jos pääpuulaji onkin todellisuudessa mänty tai koivu, ja jokin toinen tarjous olisi ollut parempi tämän puulajin osalta.

Kullekin Ähtäri-Virrat aineiston koealalle, jossa toimenpiteet olivat tietojen mukaan järkeviä tehdä heti, simuloitiin kahden tarjouksen yhdistelmiä, joista valittiin paras sekä virheellisillä että virheettömillä puulajitiedoilla. Tämän jälkeen laskettiin puukauppatulot sekä virheellisillä että virheettömillä tiedoilla, ja laskettiin keskimääräiset tulot koko aineistossa. Virheelliset puulajiosuudet aiheuttivat metsänomistajalle laskelmien mukaan selviä tulonmenetyksiä. Jo yhden euron ero puulajien hintatarjouksissa kahden tarjoajan välillä aiheutti laserkeilausaineistoa käytettäessä keskimäärin 0,14 € menetettyjä tuloja tukkiukuutiota ja 0,19 € kuitukuutiota kohti (Haara & Kangas 2018). Kaikkiaan tappio kuutiota kohti oli vähimmillään 0,17€ (2D+LASER) ja enimmillään 0,25€ (SATKU). Hehtaaria kohti tulonmenetys oli pienimmillään 9,4€/ha (2D+LASER) ja suurimmillaan 12,0€/ha (2D-ILMA). Jos pääpuulaji on mahdollista tarkastaa maastossa tätä halvemmalla, maastotarkistus tuottaa omistajalle voittoa lisääntyvinä tuloina tilanteessa, jossa tarjouksissa on hintaeroa puulajien välillä. Mikäli yksi tarjoaja tarjoaa vähintään yhden puulajin osalta enemmän kuin muut, ja muiden osalta saman verran, ei mitään riskiä väärän tarjouksen valintaan siltä osin ole, eikä puulajin maastotarkastuksella ole omistajalle lisäarvoa.

Toisaalta myös puutavaralajiosuuksissa, puuston laadussa sekä korjuukelpoisuuskartoissa piilee samanlainen hintariski kuin puulajitiedoissa. Mikäli yksi ostaja tarjoaa enemmän kuidusta, ja toinen tukista, omistajalla on olemassa riski valita väärä tarjous, ellei puutavaralajien osuuksista ole tarkkaa tietoa.

Omistajan näkökulmasta laatutiedon virhe vaikuttaa silloin, jos heikon laadun takia tukkia siirtyy kuituksi enemmän kuin on arvioitu, ja tarjous on hyväksytty tukkihintojen eikä kuituhintojen perusteella. Toisaalta omistajalla on myös riski, että hän ei saa hyvälaatuisesta leimikostaan hyvää hintaa, jos laatu on aliarvioitu. Vastaavasti ostajan riski on, että hän maksaa heikkolaatuisista kohteista liikaa, ja hyvälaatuisista kohteista liian vähän suhteessa puun arvoon jalostuksessa. Tällöin kilpailijoiden suhteellinen osuus parhaista leimikoista voi kasvaa ja sitä kautta valmiin sahaustuotteen keskihinta pienenee. Laatua koskevan lisätiedon tuottama hyöty voitaisiin laskea sahauslaskelmoitajan avulla, mutta se edellyttää aineistoa, josta laatu on mitattu.

Liian heikoksi arvioitu korjuukelpoisuusluokka alentaa omistajan saamaa hintaa, mutta liian korkeaksi arvioitu taas nostaa sitä. Tällöin luokituksen korjaaminen muuttaa hyödyn jakoa ostajan ja myyjän välillä.

4.3.2. Puukaupan transaktiokustannukset

Puukaupassa tiedot perustuvat Metsään.fi järjestelmän tuottamiin tietoihin ja toimihenkilöiden maastoarviointiin. Puukaupassa olisi saavutettavissa merkittäviä kustannussäästöjä, jos kauppa voitaisiin toteuttaa puhtaasti sähköisesti, käymättä lainkaan maastossa. Suomessa tehdään vuosittain noin 100 000 yksityistä puukauppaa. Jos kunkin kaupan yhteydessä tehdään maastokäynti keskimäärin $a' 3$ h, 40 € /tunti, puukaupan yhteydessä tehtävien maastokäyntien hinnaksi tulisi noin 12 miljoonaa euroa ilman matkoja. Koska samasta kohteesta tehdään usein kaksi tai useampia tarjouksia, voidaan arvioida kaupan liittyvien maastokäyntien hinnaksi jopa 24–36 miljoonaa euroa vuodessa.

Tällä hetkellä kaikki toimijat tarkastavat lähes kaikki kohteet (95 % tai enemmän) maastossa, koska kaukokartoitukseen perustuvat tiedot eivät ole riittävän luotettavia puulajin, puutavaralajijakauman tai laadun suhteen. Jo nykyisellään Metsään.fi tieto kuitenkin säästää maastokäyntien kustannuksia, koska tietojen tarkistaminen on nopeampaa kuin niiden mittaaminen alusta asti. Saavutettu ajan- säästö on arviolta noin 1/3 säästöstä, joka tulisi maastokäynneistä kokonaan luopumisesta. Se tarkoittaa, että jokainen käynti lyhenisi noin kolmesta tunnista kahteen tuntiin. Tällöin jo saavutettu kustannussäästö olisi noin 8–12 miljoonaa euroa vuodessa.

Ostajalle voi pelkästään kaukokartoitustietoon perustuvassa tarjouskilpailussa päätyä vääriä puulajeja, ellei puulajia tarkasteta maastossa. Jos puun ostaja saa myydyksi tarpeettomien puulajien puutavarat maksamallaan hinnalla, ostajalle jää väärästä puulajitiedosta tappioksi tarpeettoman puun eteenpäin välittämisestä aiheutuvat transaktiokustannukset.

4.3.3. Kemera-rahoituksen hallinnointi

Mitä tarkemmat metsävaratiedot ovat, sitä suurempi osuus rahoitusehtoja täyttämättömistä kohteista löytyy suoraan toimistossa tehdystä tarkastuksesta. Mikäli hakemus tarkastuksessa täyttää rahoitusehdot, sitä ei voida hylätä ilman maastotarkastusta. Noin 25 % (33 % vuonna 2017 Kaihlanen 2017) hallinnollisen tarkastuksen läpäisevistä hakemuksista ei todellisuudessa täytä haku- ehtoja, eikä niille pitäisi myöntää rahoitusta. Jos metsävaratietoa ei olisi käytettävissä, olisi tarpeen lisätä maasto- tarkastuksia olennaisesti, tai vaihtoehtoisesti hyväksyä se, että rahoitusta myönnetään kohteille, joille rahoitusta ei kuulu myöntää. Nykyisin tukia maksetaan väärin perustein arviolta 5 miljoonaa euroa vuosittain (Kaihlanen 2017), eli täydellisellä metsävaratiedolla saataisiin sen suuruinen lisä- hyöty (väärin perustein maksetut tuet poistuisivat kokonaan). Tarkemmilla tiedoilla voidaan saavut- taä lisähyötyjä siinä, että väärin perustein maksetaan vähemmän.

4.4. Tuotteen laadun paraneminen

Mikäli runkojen läpimittajakaumatieto ja puuston laatutieto olisi luotettavasti tiedossa, ja kullekin sahalle voitaisiin valikoida niiden käyttöön parhaiten soveltuvat tukit, ja katkoa ne sahalle parhaiten soveltuvalla tavalla, saatava jalostusarvon lisäys voisi olla noin 5 euroa kuutiolta (ks. Kangas & Packa- len 2018). Jos sahattava määrä on 25 M kuutiota vuodessa (2017 26,3 M kuutiota, <https://stat.luke.fi/metsateollisuuden-puun-kaytto>), voisi jalostusarvon lisäys siten olla parhaimmil- laan noin 125 miljoonaa euroa vuodessa. Parhaista kohteista voitaisiin tällöin myös maksaa omistajal- le enemmän kuin peruskohteista. Tällöin maastossa tehty laadun ja jakauman tarkennusarvio voisi myös maksaa sahalle enintään 5 euroa kuutiolta (vähennettynä omistajan saamalla lisähinnalla).

5. Koealojen valinta metsävaratiedon keruussa

5.1. Koealojen valintastrategiat

Puustotietojen ennustamisessa käytettävät opetuskoealat valittiin neljällä vaihtoehdoisella koealavalintastrategialla. Käytännön toiminnassa tämä tarkoittaisi erilaisia tapoja sijoitella koealat maastoon. Kutakin valintastrategiaa toistettiin 10 kertaa koealamäärillä 25, 50, 100, 200, 300, 400 ja 500. Koealavalintastrategioista ALS- ja LPM-otannan käyttö edellyttää, että laserkeilausaineisto on hankittu inventointialueelta ennen maastomittauksia.

5.1.1. ALS-otanta

Koealojen valintaan käytettiin laserkeilausaineistosta laskettua pituus- ja tiheystunnusta. Käytetyt tunnuksot olivat laserkeilausaineiston ensimmäisistä ja ainoista kaiuista laskettu 90 % korkeuskertymä ja tiheystunnus, joka kuvaa enintään 1 m korkeudelle osuneiden kaikujen osuutta kaikista kaiuista. Koealat jaettiin ensin tiheystunnuksen perusteella kolmeen yhtä suureen luokkaan, jonka jälkeen luokat jaettiin pituustunnuksen perusteella kolmeen yhtä suureen luokkaan. Jokaisesta luokasta valittiin satunnaisesti sama määrä koealoja lopulliseen otokseen niin, että haluttu otoskoko täyttyi.

5.1.2. LPM-otanta

Otannassa hyödynnettiin ruotsalaisten kehittämää Local Pivotal menetelmää (LPM) (Grafström ym. 2012). LPM-menetelmän avulla voidaan muodostaa otoksia, jotka kattavat mahdollisimman hyvin otokseen käytettävien muuttujien vaihtelun alkuperäisessä populaatiossa. Toisin sanoen, otoksen muuttujien jakaumat kuvaavat mahdollisimman hyvin alkuperäisen koealajoukon muuttujien jakaumaa. Tässä tapauksessa käytettiin samoja laserkeilausaineistosta laskettuja tiheys- ja pituustunnuksia kuin ALS-otannassa.

5.1.3. Spatiaalisesti systemaattinen otanta

Otantaan käytettiin koealojen spatiaalista sijaintia tutkimusalueella. Koealoja valittiin koealojen keskipisteiden x- ja y-koordinaattien perusteella siten, että ne muodostivat kullakin otoskoolla spatiaalisesti mahdollisimman kattavan otoksen tutkimusalueesta.

5.1.4. Satunnaisotanta

Koealat valittiin täysin satunnaisesti ilman apumuuttujia tai ennakkotietoa otokseen valittavasta koealasta.

5.2. Puustotunnusten ennustaminen ja saavuttamatta jääneiden tulojen arviointi

Koealojen määrän ja koealavalintastrategioiden vaikutusta tuotettavan metsävaratiedon laatuun tarkasteltiin Ähtäri-Virrat alueen aineistolle toteutetussa analyysissä. Analyysissä tutkittiin, miten vaihtoehdoisilla koealavalintastrategioilla valitut koealamäärät vaikuttavat k-lähimmän naapurin (k-NN) menetelmällä ennustettavan puustotiedon tarkkuuteen ja lopulta tiedon perusteella tehtävien metsänkäsittelytoimenpiteiden optimaalisuuteen 10 vuoden suunnittelujaksolla. Tiedon laatua ja tarkkuutta tarkasteltiin saavuttamatta jääneiden tulojen kautta.

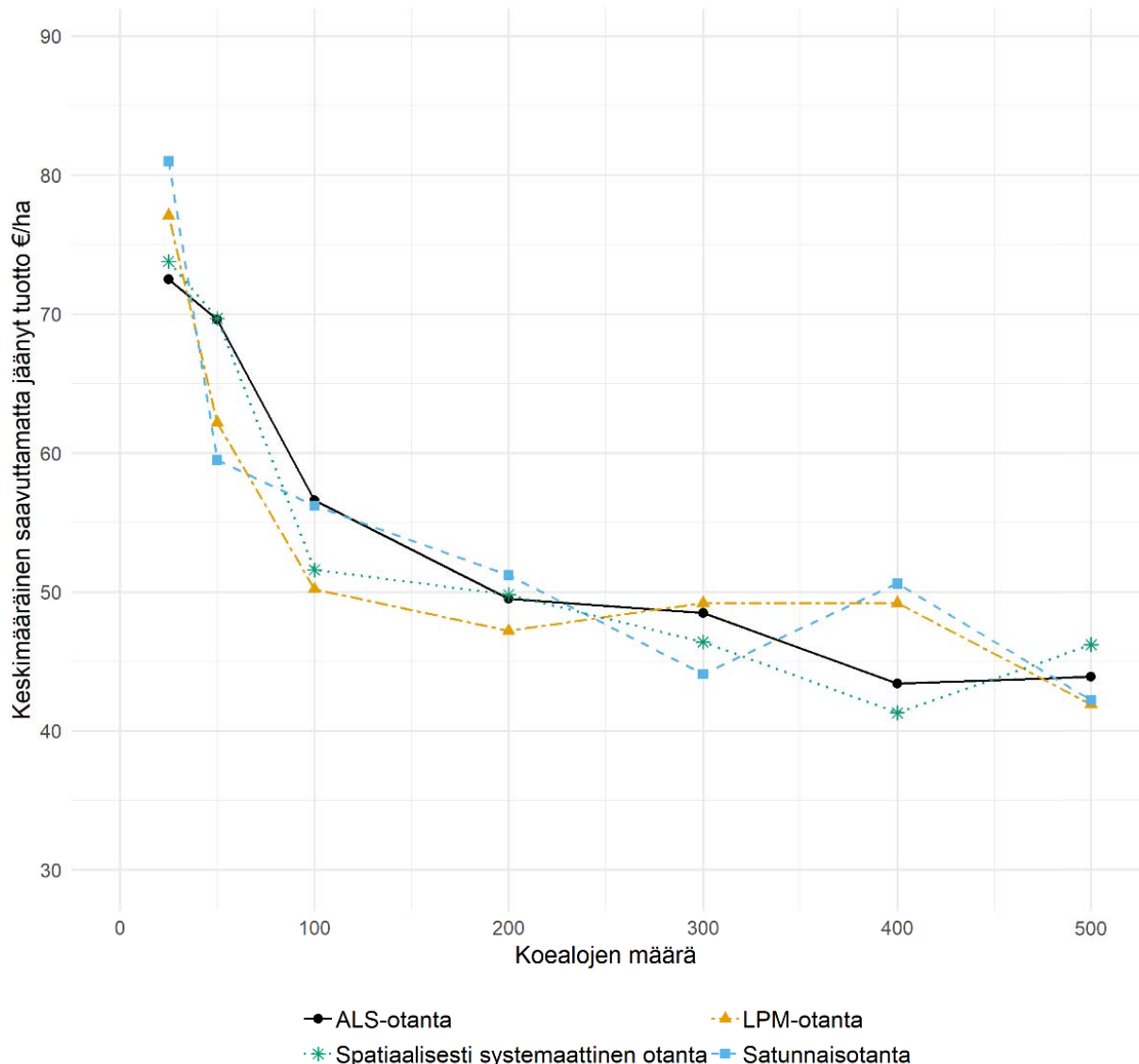
Puulajikohtaiset summa- ja keskitunnukset ennustettiin Suomessa operatiivisessa metsien inventoinnissa laajasti käytössä olevalla k-NN-menetelmällä (Packalén & Maltamo 2007). Puustotunnukset ennustettiin validointikoealoille käyttämällä vaihtoehtoisilla koealavalintastrategioilla valittuja opetuskoaloja ja kaukokartoitusaineistoista (laser- ja ilmakuva-aineistot) laskettuja selittäviä muuttujia. Tutkimuksessa oletettiin, että kun hilatason ennusteet summataan ja keskiarvoistetaan metsikkökuviotasolle, niin puustotunnusten keskineliövirhe (RMSE-%) on puolet koealatason virheestä. Tämä oletus vastaa aikaisemmissa tutkimuksissa tehtyjä havaintoja (esim. Næsset 2002, Packalén & Maltamo 2007). Tässä tutkimuksessa siis oletetaan, että päätökset käsittelyistä tehdään kuviotasolla.

Kuviotasolle skaalatut ennustetut puustotunnukset vietiin metsäsuunnittelujärjestelmään ja koealoille simuloitiin erilaisia käsittelyvaihtoehtoja seuraavalle 10 vuoden suunnittelujaksolle. Suunnittelussa käytettiin yhtä 10 vuoden suunnittelujaksoa, sillä oletettiin, että 10 vuoden päästä on saatavissa uutta ja ajantasaista inventointitietoa (eli kaukokartoitus- ja maastoaineisto kerätään uudelleen), joita käytetään seuraavissa metsäsuunnittelun laskelmissa ja päätöksenteossa. Simuloinnin jälkeen validointikoealoille valittiin käsittelyohjelmat, jotka johtivat suurimpaan nettohyötyyn, kun käytettiin 3 %:n korkokantaa. Käsittelyohjelmat valittiin erikseen maastoaineistolle ja ennustetulle aineistolle. Lopulta laskettiin validointikoealojen maastoaineistolle metsien kehitys silloin, kun noudatetaan ennustetulle aineistolle valittua käsittelyohjelmaa.

Oikeiden puustotunnusten (=maastossa mitattu koealojen kaikki puut yksitellen) perusteella valitulle optimaaliselle käsittelyohjelmalle laskettiin nettohyöty. Tästä vähennetään nettohyöty, joka saadaan, kun käytetään ennustetulle aineistolle optimoitua käsittelyohjelmaa. Tällä tavalla saadaan arvio saavuttamatta jääneistä tuloista. Saavuttamatta jääneet tulot kuvaavat taloudellisia tappioita, jotka syntyvät, kun ennustettuja puustotietoja käytetään ilman, että puustotietojen ja niiden perusteella ehdotettujen metsänkäsittelytoimenpiteiden oikeellisuutta tarkastetaan maastossa.

5.3. Koealojen valinnan vaikutus metsänomistajan saamaan hyötyyn

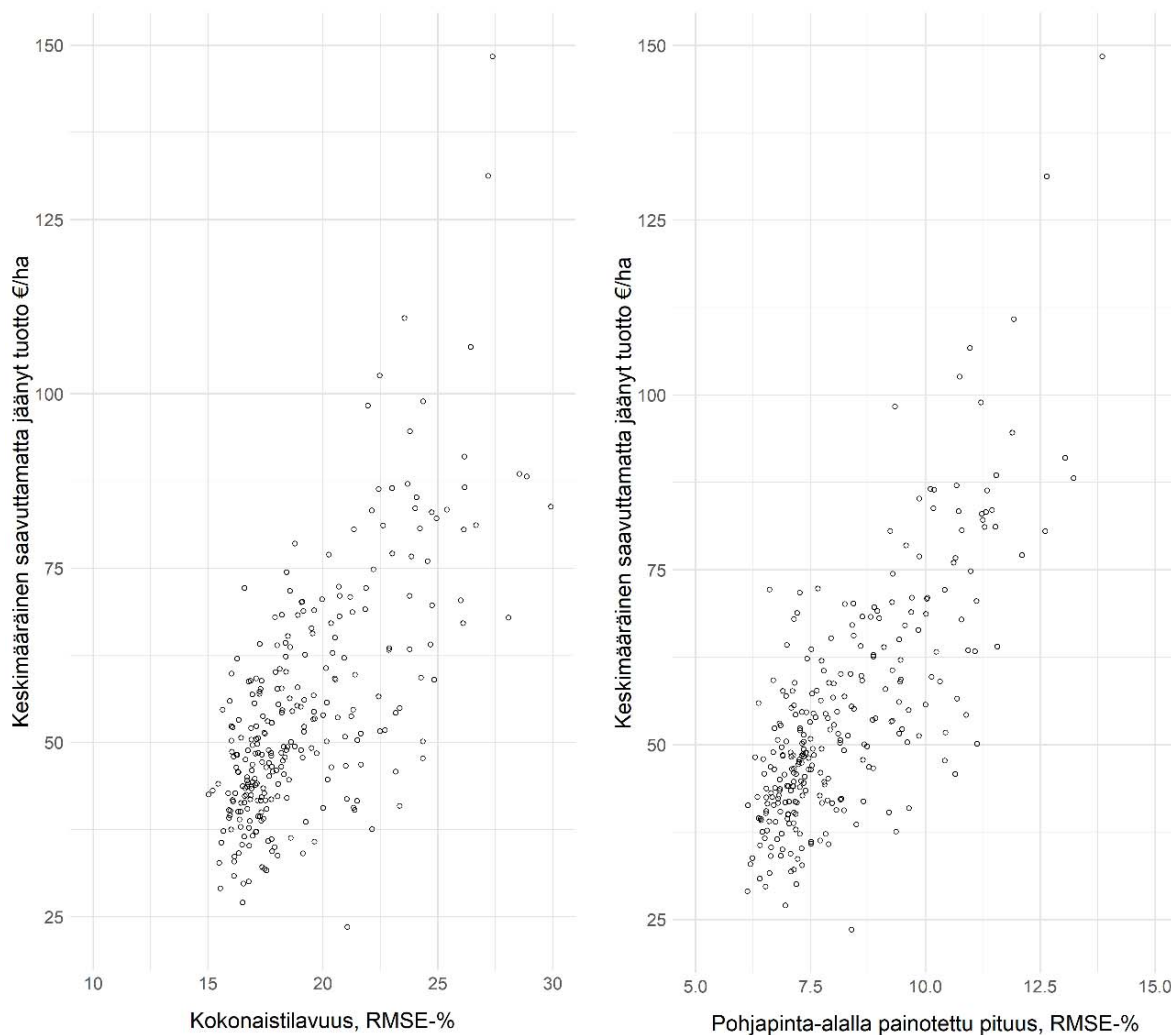
Saavuttamatta jääneet tulot vaihtelivat kuviotasolla 41,1 €/ha ja 80,7 €/ha välillä riippuen käytetystä opetuskoalojen määrästä ja koealojen valintastrategiasta ja laskennalliset tappiot olivat keskimäärin 45,4 % vastaavista koealatason tuloksista (Kuva 3). Laskennalliset tappiot pienenevät keskimäärin 13,7 %, 17,4 % ja 7,7 % kun puustotietojen ennustamiseen käytettävissä olevien koealojen määrää kasvatettiin 25, 50 ja 100 koealasta 50, 100 ja 200 koealaan. Saavuttamatta jääneet tulot vähenivät (eli tiedon laatu parani) selvästi, kun koealojen määrää kasvatettiin 25 koealasta 200 koealaan, jonka jälkeen koealojen määrän kasvattamisen tuottama lisähyöty oli vähäisempi, mutta laskennallisten tappioiden vähenemistrendi kuitenkin jatkui aina 500 koealaan saakka. Vaikka yksittäisen lisäkoealan tuottama hyöty on laskeva, oli jokainen lisäkoeala kuitenkin selkeästi kannattava investointi. Laskennallisiin tappioihin vaikutti lopulta eniten käytettyjen koealojen määrä ja erot vaihtoehtoisten koealavalintastrategioiden välillä olivat pieniä, eikä yhtä valintastrategiaa voi tämän tutkimuksen tulosten perusteella pitää selvästi toista parempana.



Kuva 3. Keskimäärin saavuttamatta jääneet tulot €/ha, kun valittiin 25–500 koealaa vaihtoehtoisten koealavaihtostrategioiden perusteella.

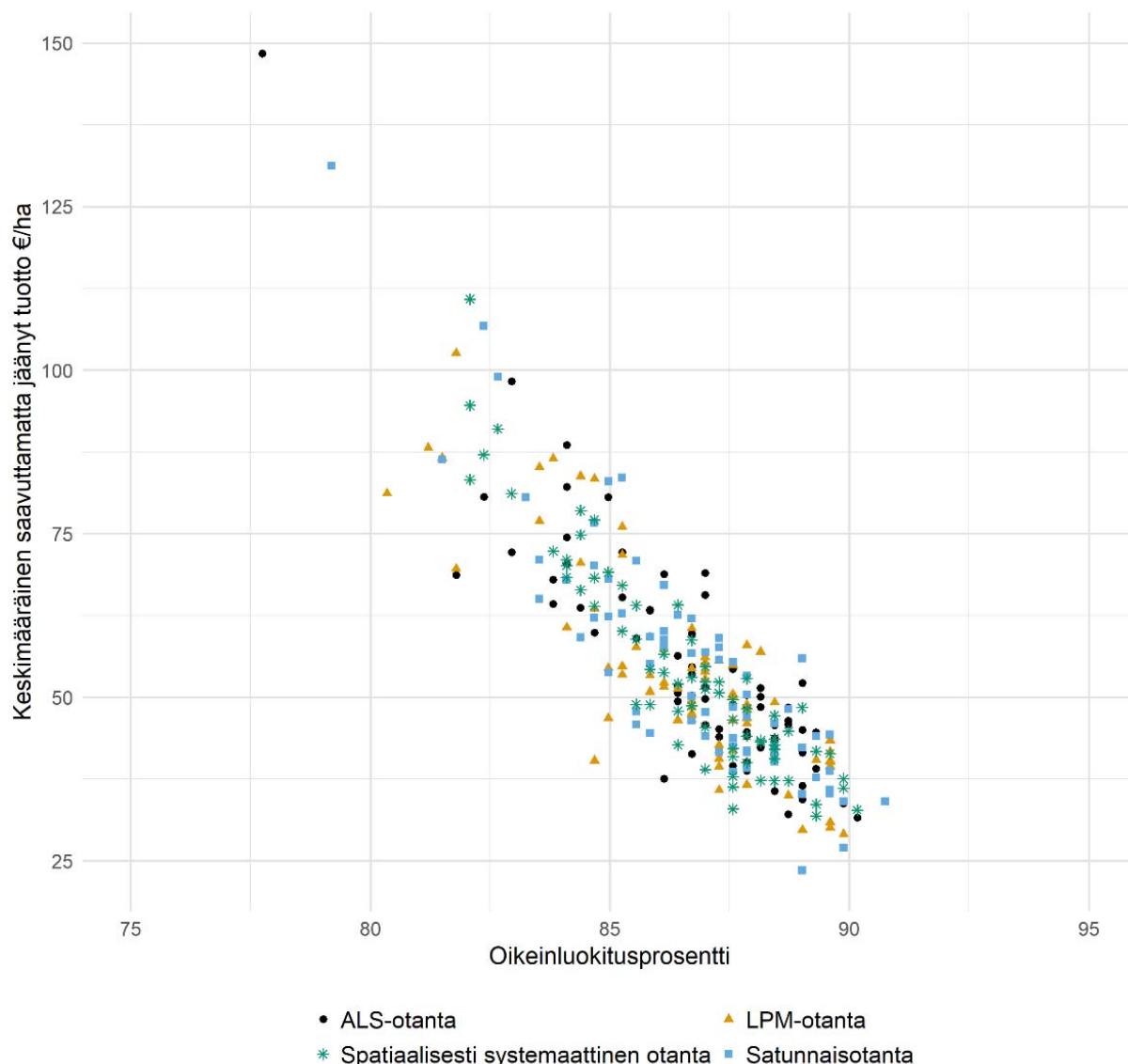
Kun saavuttamatta jääneitä tuloja verrattiin koko puuston kokonaistilavuuden ja pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden suhteelliseen keskineliövirheeseen (RMSE%), huomattiin että laskennalliset tappiot vähenivät keskimäärin 3,9 €/ha ja 8,2 €/ha, kun suhteellinen keskineliövirhe pieneni yhdellä prosenttiyksiköllä (Kuva 4). Korrelaatio pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden keskineliövirheen ja saavuttamatta jääneiden tulojen välillä oli suurempi kuin puuston kokonaistilavuudelle lasketun keskineliövirheen ja saavuttamatta jääneiden tulojen välillä. Tämä vahvistaa käsitystä ennustettujen puustotunnusten virheiden vaikutuksesta mahdollisille tulojen menetyksille. Jos puuston kokoa ja kehitystasetta kuvaavien tunnusten virhe kasvaa, niin samalla todennäköisyys nettonykyarvon kannalta epäoptimaalisille päätöksille kasvaa.

Laskennallisia tappioita voi syntyä, kun suunniteltu metsänkäsittelytoimenpide ajoittuu käytettävälle suunnittelukaudelle (Holmström ym. 2003, Duvemo ym. 2007). Jos metsikkökuvion puusto on riittävän varttunut, voidaan sallia enemmän virhettä kuvion puustotunnuksissa, sillä ennustetun aineiston perusteella seuraava ehdotettava toimenpide olisi joka tapauksessa suurella todennäköisyydellä pätevä. Toisin sanoen, puustoltaan nuoremmat metsikkökuviot ovat kaikkein tärkeimpiä mahdollisten saavuttamatta jäävien tulojen arvioinnin kannalta.



Kuva 4. Kokonaistilavuuden ja pohjapinta-alalla painotetun keskipituuden suhteellisen keskineliövirheen (RMSE-%) suhde keskimääräisiin saavuttamatta jääneisiin tuloihin (€/ha). Saavuttamatta jääneet tulot on esitetty ilman, että niitä on keskiarvoistettu 10 toistolle.

Tuloja jää saavuttamatta, kun metsikkökuvion ennustetun puustotiedon perusteella valittu käsittelyohjelma (käsittely ja/tai sen ajankohta) eroaa todellisesta optimista virheellisten puustotietojen takia. Ennustetut puustotunnukset voivat olla yli- tai aliarvioita todellisiin tunnuksiin verrattuna; yli- tai aliarvio voi syntyä kaikille metsikkökuvion ositteille tai vain joillekin ositteista. Toisaalta puulajikohtaiset yli- ja aliarviot voivat tasapainottaa toistensa vaikutuksia käsittelyjen oikeellisuuden kannalta. Tutkimuksessa laskettiin myös käsittelyjen samankaltaisuudelle oikeinluokitusprosentti. Käsittely katsottiin oikein luokituneeksi, jos maastoaineiston ja ennustetun aineiston perusteella valitut käsittelyt olivat identtiset (esim. kummassakin tapauksessa toteutettiin alaharvennus). Käsittelyjen oikeinluokitus parani selvästi, kun käytettävien harjoituskoealojen määrää kasvatettiin ja saavuttamatta jääneet tulot vähenivät keskimäärin 7 €/ha, kun oikeinluokitusprosentti kasvoi yhden prosenttiyksikön (Kuva 5).



Kuva 5. Käsittelyjen oikeinluokitusprosentti esitettynä yhdessä keskimääräisten saavuttamatta jääneiden tulojen €/ha kanssa. Saavuttamatta jääneet tulot on esitetty ilman, että niitä on keskiarvoistettu 10 toistolle.

Saavuttamatta jääneiden tulojen suuruutta voidaan havainnollistaa hehtaarikohtaisten lukujen lisäksi inventointialueetasolla. Jos esimerkiksi inventointialueen koko on 100 000 ha ja saavuttamatta jääneet tulot ovat tässä tutkimuksessa havaitulla tasolla, niin laskennalliset tappiot ovat arviolta noin 5,3 M, kun käytettävien harjoituskoealojen määrä on 100. Vastaavasti kun käytettävien koealojen määrä on 300 ja 500 ovat laskennalliset tappiot arviolta noin 4,7 M ja 4,3 M. Näin ollen saavuttamatta jääneiden tulojen määrä vähenee arviolta noin miljoona euroa, kun käytettävien koealojen määrää kasvatetaan 100 koealasta 500 koealaan. Jos yhden koealan mittaaminen maksaa 100 €, voidaan lisäkoealojen mittaamista pitää yhteiskunnan kannalta erittäin kannattavana investointina, sillä saavuttamatta jäävät tulot pienenevät huomattavasti enemmän, kuin mitä lisäkoealojen mittaaminen maksaa. Kun eri koealavalintastrategioiden saavuttamattomiksi jäävistä tuotoista laskettiin keskimääräinen arvio koealojen määrän suhteen, yhden koealan tuottama lisähyöty on vielä 500. koealan kohdallakin yli 3000 euroa kun oletettiin 200 000 hehtaarin suuruinen inventointialue.

6. Ajantasaistuksen ja uudelleen inventoinnin luotettavuus

6.1. Metsävaratiedon tuottaminen eri menetelmin

Laserkeilaukseen perustuvat puustotunnukset tuotettiin vuosille 2007, 2009 ja 2014, lisäksi vuosille 2009 ja 2014 tuotettiin ilmakuvapintamalliin perustuvat tunnuksat (ks. Luoma ym. 2019). Sekä laserkeilaus- että ilmakuvapintamallista laskettiin kasvillisuuden pituutta, tiheyttä ja piteuden vaihtelua kuvaavia piirteitä, joista valittiin parhaiten maastomittauksista saatujen keski- ja valtapiteuden, pohjapinta-alan sekä puiden pituuksien keskihajonnan kanssa korreloivat piirteet lopullisiin malleihin. Lisäksi hyödynnettiin kunkin vuoden ilmakuvista laskettua normalisoitua kasvillisuusindeksiä (normalized difference vegetation index, NDVI) tehostamaan eri puulajien puustotunnusten ennustamistarkkuutta. Puustotunnukset ennustettiin kokonaispuuston lisäksi puulajiositteittain (mänty, kuusi ja lehtipuu).

Ennustuksissa hyödynnettiin ei-parametrissa k-NN-menetelmää, jonka yhteydessä käytettiin random forest -algoritmia etsimään lähimpiä naapureita. Ennusteiden tarkkuutta arvioitaessa käytettiin ristiinvalidointia, jolloin koeala, jolle ennustetta oltiin laskemassa, ei ollut mukana naapureita etsittäessä. Ennusteiden validoinnissa käytettiin vuoden 2014 maastoreferenssiä 91 koealalta. Ennustukset tehtiin samalla tavalla sekä laserkeilausaineistoja että ilmakuvapintamalleja käyttäen.

Vuosien 2007 ja 2009 kaukokartoitukseen perustuvat puustoennusteet päivitettiin vuoteen 2014 SIMO-ohjelmiston MELA-kasvumalleilla. Lisäksi selvitettiin, miten aikaisempia inventointeja (ts. puustoennusteita) voidaan hyödyntää lopullisessa puustotunnusten ennustamisessa. Tässä käytettiin nk. data-assimilaatiota, jossa vanha inventointitieto (esim. vuodelta 2009) päivitettiin kasvumalleilla vuoteen 2014 ja yhdistettiin se vuoden 2014 inventointitiedon kanssa. Tällä haluttiin selvittää miten tällaisella lähestymistavalla ennustetut puustotunnukset (ja niiden tarkkuus) eroavat puustotunnuksista, jotka on ennustettu perinteisesti, joko laserkeilaus- tai ilmakuvapistepilviä hyödyntäen.

Lopullisia ennusteita vuodelle 2014 olivat i) ko. vuoden laserkeilaukseen ja ii) ko. vuoden ilmakuvapintamalliin perustuvat puustoennusteet, iii) vuoden 2007 laserkeilauksella tuotetut puustoennusteet päivitettyinä kasvumalleilla vuoteen 2014, iv) vuoden 2009 laserkeilauksella tuotetut puustoennusteet päivitettyinä kasvumalleilla vuoteen 2014, v) vuoden 2009 ilmakuvapintamallilla tuotetut puustoennusteet päivitettyinä kasvumalleilla vuoteen 2014.

Lisäksi data-assimilaatiolla tuotettiin neljällä eri aineistoyhdistelmällä puustotunnukset vuoteen 2014. Nämä yhdistelmät olivat: i) vuosien 2009 ja 2014 laserkeilaukseen perustuvat puustotiedot, ii) vuoden 2009 ilmakuvapintamalliin ja vuoden 2014 laserkeilaukseen perustuvat puustotiedot, iii) vuoden 2009 laserkeilaukseen ja vuoden 2014 ilmakuvapintamalliin perustuvat puustotiedot, sekä iv) vuosien 2009 ja 2014 ilmakuvapintamalliin perustuvat puustotiedot.

Kaikkia ennusteita verrattiin vuoden 2014 maastomittauksiin ja puustotietojen luotettavuutta arvioitiin absoluuttisen ja suhteellisen keskineliövirheen (RMSE) ja harhan avulla.

6.2. Metsävaratiedon luotettavuuden vaikutus metsänomistajan saamaan hyötyyn

Metsävaratiedon ajantasaisuuden kustannushyötyanalyysissa käytettiin tutkimustilana Evolla sijaitsevaa 91 tasakokoisen kuvion metsätilaa. Tutkimustilalle laadittiin metsäsuunnitelmat eri menetelmin tuotetun ajantasaisen metsävaratiedon perusteella seuraavan 10-vuotiskauden ajalle. Metsä-

suunnitelmat tuotettiin IPTIM-optimointi- ja simulointiohjelmalla (Tapio/Simosol) ja ne perustuivat vuodelle 2014 eri menetelmillä tuotettuihin puustotietoihin. Tutkimustilan metsäsuunnitelman tavoitteena oli maksimoida tilan nettonykyarvoa ja korkokantana käytettiin Suomessa näille laskelmille tyypillistä 3 % korkoa.

Vuosi 2014 valittiin metsäsuunnittelun kannalta 10-vuotiskauden alkuhetkeksi ja referenssivuodeksi eri menetelmien vertailuun. Tämän vuoksi vuosien 2007 ja 2009 inventointien tulokset päivitettiin kasvumalleilla vuoden 2014 tasolle suunnitelmien laadintaa varten. Päivityksen jälkeen käytössä oli vuodelle 2014 viidet eri menetelmillä tuotetut puustotunnukset, joiden perusteella voitiin laatia viisi metsäsuunnitelmaa. Tämän jälkeen inventointimenetelmien tuloksiin perustuneet metsäsuunnitelmat toimeenpantiin tutkimustilalla, siten, että tilan puustotunnukset perustuivat maastomittauksiin. Näin voitiin simuloida 10-vuotiskauden ajan todellinen tilanne, jossa suunnitelma perustuu tietyllä menetelmällä ennustettuihin inventointitietoihin, mutta suunnitelman toteutus tapahtuu todellisten puustotietojen pohjalta. Suunnitelman onnistumista vertailtiin niiden noudattamisesta syntyvällä hehtaarikohtaisella nettonykyarvolla 3 % korkokantaa käyttäen. Kustannushyötyanalyysissä oletettiin, että lähtötilanne on vuonna 2009 tehty inventointi ja kasvumalleilla päivittäminen vuoteen 2014. Muiden vaihtoehtojen, ts. tämän lisäksi tehtävä uusi inventointi vuonna 2014 tai inventointi vuonna 2007 ja kasvumalleilla päivitys, tuottamia hyötyjä tai mahdollisia kustannuksia nettonykyarvossa mitattuna verrattiin lähtötilanteeseen.

Koska kustannushyötyvertailussa haluttiin tarkastella inventointiajankohdan ja metsävaratiedon tuottamismenetelmän lisäksi myös inventointikierron pituudesta syntyviä kustannuksia, tehtiin oletus, jonka mukaan vuoden 2009 laserkeilausaineiston keruu ja ilmakuvapintamallin tuottaminen olivat osa ns. normaalia inventointikiertoa ja vuoden 2014 inventointi olisi ylimääräinen (ts. siitä aiheutuisi lisäkustannuksia), mutta toteutuessaan tarkoittaisi 5 vuoden inventointikiertoa. Analyseissä vuoden 2007 laserkeilausaineiston keruu toimi vaihtoehtoisena inventointina vuoden 2009 aineiston keruulle eli sen käyttö varhensi inventointiajankohtaa ja pidensi kuvitteellisen inventointikierron 7 vuoteen.

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös data-assimilaation perusteella saatujen puustotunnusten vaikutusta metsäsuunnitelmaan ja tilan nettonykyarvoon.

6.3. Kaukokartoituksella tuotettujen puustotietojen tarkkuus (ns. inventointitarkkuus)

Tutkimuksessa lentolaserkeilaukseen ja ilmakuvapintamalliin perustuvat puustotunnusten tarkkuudet vuodelle 2014 eivät juuri eronneet. Vuodelle 2014 ennustetun kokonaistilavuuden suhteellinen RMSE vaihteli vain 0,3 %-yksikköä, kun vertailtiin laserkeilauksella (suhteellinen RMSE 27,21 %) ja ilmakuvapintamallilla (suhteellinen RMSE 27,49 %) tuotettuja ennusteita (Taulukko 1). Puulajikohtaisen tilavuusennusteiden suhteellinen RMSE oli laserkeilauksella n. 2 ja 6 prosenttiyksikköä parempi havupuilla, mutta lehtipuuositteella n. 11 prosenttiyksikköä huonompi kuin ilmakuvapintamallilla. Kokonaistilavuuden aliarvio oli 0,04 % laserkeilauksella kun taas ilmakuvapintamallilla kokonaistilavuus yliarviointiin 0,9 %:lla. Puulajeittaisten tilavuuksien harhat olivat männyllä ja kuusella pienempiä, kun puustotiedot oli tuotettu laserkeilauksella, lehtipuilla suhteellinen harha oli pienempi ilmakuvapintamallilla.

Verrattaessa tässä tutkimuksessa käytettyjen kaukokartoitusinventointimenetelmien tarkkuutta toisiinsa, ei voida havaita merkittävää eroa toisen menetelmän/aineiston eduksi pelkän ennustetarkkuuden perusteella. Ennustetarkkuudet vastaavat myös yleisesti ko. menetelmille raportoituja tarkkuustasoja. Vuosien 2007 ja 2009 laserkeilauksella ja vuoden 2009 ilmakuvapintamallilla tuotettujen

puustotunnusennusteiden suhteelliset RMSE ja harha olivat samalla tasolla vuoden 2014 puustotunnusten luotettavuuksien kanssa.

Taulukko 1. Kaukokartoitukseen perustuvien puustotunnusten ennustamisen luotettavuus vuoden 2014 inventoinneissa. Koealojen lukumäärä = 91. ALS = lentolaserkeilausaineistoon perustuva ennuste, DAP = ilmakuvapintamalliin perustuva ennuste. Negatiivinen harha on yliarvio ja positiivinen harha on aliarvio.

Aineisto	Osio	Harha (%)					RMSE (%)				
		N	PPA	Dg	Hg	V	N	PPA	Dg	Hg	V
ALS	Koko puusto	4.64	0.36	-1.36	-0.60	0.04	64.93	25.85	15.65	8.11	27.21
	Mänty	-1.62	-3.57	-2.33	-2.26	-3.05	83.72	77.65	22.98	12.10	86.19
	Kuusi	5.70	2.27	-13.45	-14.65	1.05	95.68	95.68	41.62	37.96	107.03
	Lehtipuu	10.94	6.54	-20.25	-12.28	6.10	166.46	149.62	60.95	38.82	158.36
DAP	Koko puusto	0.11	-0.90	-0.35	-0.12	-0.90	64.91	27.05	16.10	8.92	27.49
	Mänty	-4.90	-5.40	-0.55	-2.23	-5.33	97.36	81.21	23.32	12.29	88.42
	Kuusi	0.46	2.70	-12.40	-14.00	2.48	111.74	104.75	52.04	46.41	113.41
	Lehtipuu	5.83	3.72	-13.92	-8.00	3.78	162.67	141.41	52.04	31.54	147.80

6.4. Metsävaratiedon päivityksen tarkkuus (ns. ajantasaistamisen tarkkuus)

Vuosille 2007 ja 2009 ennustetut puustotunnukset päivitettiin vuoteen 2014 SIMO-laskentaohjelmistolla. Päivitettyjen ennusteiden suhteellinen RMSE puuston kokonaistilavuuden osalta oli vuoden 2007 puustotietojen päivityksen jälkeen 30,08 % (Taulukko 2). Kun vuoden 2009 laserkeilauksella tuotettujen puustotiedot päivitettiin, suhteellinen RMSE oli 25,15 % kun taas ilmakuvapintamallilla tuotettujen puustotunnusten päivityksen suhteellinen RMSE oli 26,45 %. Erot päivityksen ja vuoden 2014 kaukokartoitusaineistoihin perustuvien puustotunnusten suhteellisten RMSE:n välillä olivat pienet. Merkittävin ero ajantasaistamisella tuotettujen ennusteiden ja pelkkien vuoden 2014 inventointien välillä oli suhteellisessa harhassa. Päivitetyt inventoinnit tuottivat kokonaistilavuuden aliarvion, joka vaihteli välillä 10,27 % ja 14,62 %, kun pelkän inventoinnin harha oli vain +/- 1 %. Harhan lisääntyminen päivityksen seurauksena oli merkittävää tarkasteltaessa myös tilavuusennusteita puulajiositteittain. Samansuuntainen harhan lisäys kasvumalleilla päivitettäessä on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa (esim. Luoma ym. 2017, Holopainen ym. 2010).

Taulukko 2. Kaukokartoituksen perustuvien puustotunnusten kasvumalleilla päivittämisen luotettavuus. Puustotunnukset ennustettiin lentolaserkeilaukseen (ALS) ja ilmakuvapintamalliin (DAP) perustuen vuosille 2007 ja 2009 ja päivitettiin kasvumalleilla vuoteen 2014. Koealojen lukumäärä = 91. Negatiivinen harha on yliarvio ja positiivinen harha on aliarvio.

Päivitysjakso	Aineisto	Osite	Harha (%)					RMSE (%)				
			N	PPA	Dg	Hg	V	N	PPA	Dg	Hg	V
2007-2014	ALS	Koko puusto	20.42	1.93	4.59	11.16	14.62	75.70	21.12	25.16	21.86	30.08
		Mänty	7.11	5.14	9.66	11.91	16.31	86.47	72.56	36.27	24.22	81.84
		Kuusi	32.39	11.79	-25.91	-15.65	24.26	120.87	93.81	68.20	55.66	117.27
		Lehtipuu	21.02	-25.33	-22.22	-2.73	-11.22	135.33	93.92	56.22	35.17	97.86
2009-2014	ALS	Koko puusto	33.39	9.03	-0.88	2.89	11.34	62.87	21.44	14.64	8.20	25.15
		Mänty	3.66	-2.12	3.26	4.33	0.29	65.13	68.44	19.20	8.48	80.04
		Kuusi	50.68	20.87	-15.65	-12.56	22.93	100.68	112.38	53.13	45.80	130.56
		Lehtipuu	47.22	14.71	-20.86	-8.26	15.99	131.84	109.88	48.82	33.95	118.80
2009-2014	DAP	Koko puusto	28.37	7.36	0.37	3.35	10.27	65.09	25.40	13.26	8.83	26.45
		Mänty	2.79	2.74	3.99	4.56	7.31	70.13	69.78	22.03	11.73	81.38
		Kuusi	39.96	10.76	-17.79	-14.91	12.34	106.83	109.27	45.33	40.17	122.62
		Lehtipuu	44.62	12.61	-18.57	-8.69	13.81	143.73	118.28	44.97	29.62	124.79

6.5. Aikaisemman inventoinnin hyödyntäminen (data-assimilaation tarkkuus)

Data-assimilaation avulla ennustetun kokonaistilavuuden suhteellinen RMSE vaihteli eri yhdistelmillä 25,08 % ja 26,90 % välillä (Taulukko 3), mikä on samaa suuruusluokkaa muilla menetelmillä tuotettujen kokonaistilavuuden ennustetarkkuuksien kanssa. Kuitenkin vuoden 2014 alkuperäisiin inventointeihin verrattuna, puustotunnusennusteiden suhteellinen harha oli huomattavasti suurempi data-assimilaatiolla kuin pelkällä vuodelle 2014 tehdyillä inventoinneilla. Voidaan siis todeta, ettei data-assimilaatio tuottanut parannusta puustotunnusennusteiden luotettavuuteen.

Taulukko 3. Data-assimilaatiolla tuotettujen puustotunnusten luotettavuus. Puustotunnukset ennustettiin vuosien 2007, 2009 ja 2014 lentolaserkeilausaineistojen (ALS) ja ilmakuvapintamallien (DAP) yhdistelmillä vuoden 2014. Koelajojen lukumäärä = 91. Negatiivinen harha on yliarvio ja positiivinen harha on aliarvio.

Aineisto -yhdistelmät	Osite	Harha (%)					RMSE (%)				
		N	BA	Dg	Hg	V	N	BA	Dg	Hg	V
2007 ALS 2009 ALS 2014 ALS	Koko puusto	26.66	3.47	2.22	7.04	10.79	65.98	21.12	18.10	13.65	25.35
	Mänty	3.71	-1.10	5.90	6.56	4.89	74.45	65.92	27.44	14.62	75.21
	Kuusi	31.48	-40.41	-18.75	-12.57	19.55	96.47	74.50	49.05	42.63	110.72
	Lehtipuu	34.11	4.23	-19.69	-4.84	9.49	136.00	114.21	46.34	30.00	119.98
2007 ALS 2009 DAP 2014 ALS	Koko puusto	24.44	3.54	2.70	7.21	11.41	67.11	22.77	18.04	13.66	26.90
	Mänty	4.34	0.69	6.08	6.68	8.02	73.42	65.99	27.63	15.00	75.84
	Kuusi	27.72	-41.67	-19.73	-13.46	16.17	99.30	74.17	48.31	41.97	108.25
	Lehtipuu	34.84	4.46	-19.43	-5.34	9.80	142.04	117.08	46.68	30.30	122.96
2007 ALS 2009 ALS 2014 DAP	Koko puusto	26.72	2.99	2.50	7.27	10.81	65.88	21.45	18.23	13.90	25.08
	Mänty	2.00	-2.68	6.35	6.39	2.38	78.88	68.98	27.50	14.27	77.14
	Kuusi	30.00	-40.68	-18.23	-12.48	20.11	99.98	77.67	51.31	44.36	112.06
	Lehtipuu	32.89	2.80	-18.09	-4.23	8.50	133.81	109.29	45.38	29.52	115.59
2007 ALS 2009 DAP 2014 DAP	Koko puusto	24.41	3.10	2.99	7.44	11.44	67.19	23.25	18.13	13.92	26.82
	Mänty	2.64	-1.17	6.52	6.51	5.29	78.26	68.75	27.71	14.63	77.04
	Kuusi	26.19	-41.88	-19.19	-13.34	16.72	103.46	77.06	50.35	43.63	110.01
	Lehtipuu	33.77	3.23	-17.79	-4.76	8.94	140.61	113.01	46.03	29.92	119.05

6.6. Inventointiajankohdan ja -menetelmän vaikutus metsänomistajan saamaan hyötyyn

Lopullinen kustannushyötyanalyysi tehtiin vain metsäsuunnitelmille, joiden suunnitteluaineistona käytettiin laserkeilausaineistolla tuotettuja puustotietoja. Vaikka tässä tutkimuksessa myös vuoden 2014 ilmakuvapintamalleilla tuotettujen puustotunnusennusteiden luotettavuudet olivat samalla tasolla laserkeilauksella tuotettujen puustotunnusten kanssa, yleinen konsensus laserkeilauksen käytöstä tulevaisuudessakin ensisijaisena menetelmänä tuottaa metsävaratietoa metsäsuunnittelun tarpeisiin johti kustannushyötyanalyysin aineistovalintaan.

Metsäsuunnitelmat toteutettiin simuloimalla ehdotetut toimenpiteet tutkimustilan todellisella puustolla. Tutkimuksessa asetetun oletuksen mukaisesti vuonna 2009 tehty inventointi ja päivitys oli lähtötilanteena ja kahden muun vaihtoehdon (uusi inventointi vuonna 2014 tai inventointi jo vuonna 2007 ja kasvumalleilla päivitys) tuottamia nettohyötyjä sekä mahdollisia lisäkustannuksia verrattiin lähtötilanteeseen (Luoma ym. 2019).

Metsäsuunnitelma, joka laadittiin vuoden 2009 laserkeilauksella tuotettujen ja kasvumalleilla päivityttävien puustotietojen perusteella tutkimustilalla tuotti 12339,2 €/ha nettohyötyä (NNA) (Taulukko 4). Mikäli suunnitelmassa käytettiin vuonna 2014 tuotettuja uusia, laserkeilaukseen perustuvia puustotietoja, joiden hankkimisen lisäkustannukset olivat noin 5€/ha (suullinen tiedonanto Metsäkeskus/Juho Heikkilä), ts. inventointikiertona käytettiin 5 vuotta, tilalta saavutettu NNA ylimää-

räisen inventointikerran lisäkustannukset huomioon ottaen oli 12395,2 €/ha. Toisin sanoen, uusi inventointi tuotti metsänomistajalle 56 €/ha lisähyödyn. Sen sijaan, jos inventointikiertoa olisi pidennetty entisestään siten, että metsäsuunnitelma perustuisikin 7 vuotta sitten tehtyyn inventointiin ja kasvumalleilla päivitettyyn ennusteeseen, hyöty verrattuna uuteen ajantasaiseen inventointiin nähden oli - 177,4 €/ha. Näin ollen inventointikierron pidentäminen kahdella vuodella viidestä seitsemään tuotti negatiivista hyötyä n. 120 €/ha tilan NNA:ssa mitattuna.

Taulukko 4. Metsäsuunnitelmien tuottamat hyödyt ja inventoinnin kustannukset sekä niiden yhteisvaikutus nettonykyarvossa (NNA) mitattuna. Lisäksi eri suunnitelmien tuottamien kustannusten ja hyötyjen yhteisvaikutusta verrattiin lähtötilanteeseen, jossa inventointi tehtiin 2009 laserkeilauksella ja puustotiedot päivitettiin vuoteen 2014 (ALS2009 + päivitys).

Menetelmä	Hyödyt metsäsuunnitelman toteuttamisesta 10 v. ajalta NNA €/ha	Kustannukset metsäsuunnitelman laadintaan vaadittavista aineistoista			Kustannukset + hyödyt NNA €/ha	Ero lähtötilanteeseen (ALS2009 + päivitys) NNA €/ha
		Inventointi 2007 NNA €/ha	Inventointi 2009 NNA €/ha	Inventointi 2014 NNA €/ha		
ALS2007 + päivitys	12 224,0	- 6,2			12 217,8	-121
ALS2009 + päivitys	12 345,0		- 5,8		12 339,2	
ALS2014	12 406,0		- 5,8	- 5,0	12 395,2	56

7. Metsävaratiedon keruu tulevaisuudessa

Metsävaratiedon tuottamisessa käytetään jatkossakin 3D-kaukokartoitusaineistoja. Laserkeilausaineisto tuotti kokonaispuuston osalta tarkempia tuloksia kuin ilmakuvapintamalliin perustuvat ennustukset, vaikka tässä tutkimuksessa suuria eroja ei näiden kahden kaukokartoitusaineiston välillä havaittu: Kokonaistilavuuden suhteellinen RMSE oli laserkeilauksella 27,2 % ja ilmakuvapintamallilla 27,5 %. Muissa tutkimuksissa menetelmien välinen luotettavuusero on yleisesti ollut suurempi. Esimerkiksi Tuominen ym. (2017) saivat suhteellisen RMSE:n eroksi kokonaistilavuudelle 3,73 yksikköä, Kangas ym. (2018) 6,36 yksikköä ja Kukkonen ym. (2017) jopa 10,53 yksikköä. Toisaalta omistajan näkökulmasta menetelmät voivat tuottaa tällöinkin käytännössä identtisen hyödyn (esim. Kangas ym. 2018a). Vaikka RMSE:n parantaminen 1 yksiköllä tuottaa keskimäärin noin 4€/ha, tapauskohtaisesti saavutettu hyöty vaihtelee huomattavasti muiden selittävien seikkojen, kuten laskennassa käytetyn aineiston rakenteen vaihtelun takia Kangas ym. (2018a).

Aineistojen saatavuudessa on kuitenkin huomattavia eroja. Ilmakuvien keskinäinen laatu riippuu hyvin paljon säätilasta ja erityisesti valo-olosuhteista. Tästä syystä saman laatuisten ilmakuvien tuottaminen yhdelle inventointialueelle on huomattavasti haastavampaa kuin vastaavan laserkeilausaineiston tuottaminen. Ilmakuvien takia voidaan joutua lentämään useampia kertoja samalla alueella, jotta laatu eri kuvien välillä on vertailukelpoista, jos ja kun säätila vaihtelee. Laserkeilaukseen säätila ei vaikuta niin paljon; aineiston laatu on pilvisellä ja aurinkoisella säällä samanlaista toisin kuin ilmakuvissa. On mahdollista, että ennustettavien puustotunnusten laatua voidaan parantaa siten, että kuvien/keilausten väliset laatueroja huomiodaan mallinnuksessa. Siten laajan alueen mallinnuksen kehittäminen voi olla seuraava, tärkeä kehitysaskel metsävaratiedon parantamisessa.

Suunnitelmat uudesta kansallisesta laserkeilausohjelmasta ja sen toteuttamisesta ovat valmistumassa (Laser2020), joten laserkeilausaineistojen saatavuus näyttää turvatulta myös tulevaisuudessa. Suunnitelmia ilmakuvapintamallien operationaalisen tason hyödyntämisestä puustotietojen tuottamisessa ei ole tehty. Tällä hetkellä laserkeilaus näyttää selkeästi parhaalta vaihtoehdolta uuden sukupolven metsävaratiedon hankintaa ajatellen. Ilmakuvapistepilvimateriaalia voidaan soveltaa lähinnä erityistilanteissa, esimerkiksi jos tavoiteltu laserkeilauksen kuuden vuoden kierto ei ole mahdollinen. Tämä kuitenkin edellyttää tarkempia tutkimuksia siitä, miten kuvien laadun tasoerot voidaan huomioida.

Koska aineiston saatavuudessa on selkeitä riskejä, täytyy niiden varalta olla riskinhallintasuunnitelma. On mahdollista, että keilausalueelta ei saada samalta vuodelta ilmakuvia, koska pilvisuus estää kuvaukset. Toisaalta tulkinta ilman sävyarvotietoa heikentää selvästi puulajitulkinnan tuloksia. Näissä tilanteissa satelliittikuvan käytöstä on huomattavasti apua, vaikka tarkkuus ei aivan yllä ilmakuvan tasolle (Kukkonen et al. 2018). Toisaalta myös satelliittikuvan saatavuus on pilvisillä säillä heikko. Tällöin voidaan käyttää esimerkiksi edellisinä vuosina kuvattuja satelliitti- tai ilmakuvia. Vanhojen kuvien käytöstä mahdollisesti seuraava laadun huonontuminen olisikin hyvä tutkia.

Koealojen valinnassa kaikki menetelmät tuottivat hyvin samansuuntaisia tuloksia, myös satunnainen otanta ja (VMI:n kaltainen) systemaattinen otanta. Koealojen määrän lisäämisellä oli selvästi merkittävämpi vaikutus. Siten VMI-koealojen ja erikseen valittujen lisäkoealojen yhdistelmä näyttää varteenotettavalta tavalla valita koealat uuden sukupolven metsävaratiedossa. Yksi VMI-koeala edustaa Etelä-Suomessa noin 185 hehtaaria (pysyvät ja kertakoealat yhteensä), jolloin tyyppilliselle 200 000 hehtaarin inventointialueelle sijoittuu reilu 1000 koealaa, joista kunakin vuonna mitataan reilu 200 koealaa. Tämä ei saatujen tulosten valossa ole riittävän iso opetusaineisto, vaikka kaikki ao. koealat olisivat tulkinnassa käyttökelpoisia. Inventointialueiden kasvattaminen edelleen parantaisi mahdollisuuksia käyttää VMI-koealoja tulkinnassa. Koska koealojen määrän vaikutus oli niin selkeä, kannattaa selvittää, onko mahdollista hyödyntää lisäksi VMI:ssä aiempina vuosina mitattuja ja päivitettyjä koe-

aloja, toisen keilausalueen koealoja tai samalta alueelta tehdyn aiemman keilauksen koealoja tulkinassa.

Kasvumallien käyttö lisäsi puustoennusteiden harhaisuutta ajantasaiseen kaukokartoitusinventointiin nähden. Lisäksi pidempi inventointiväli (7 vuotta) kasvatti puustoennusteiden virhettä sekä harhaa. Samalla se pienensi esimerkkitalalta saatavia hyötyjä. Vanhan inventointitiedon päivittämisen ja uuden inventoinnin yhdistäminen (data-assimilaatio) ei myöskään tuottanut merkittäviä parannuksia ennustetarkkuuksiin. Näin ollen noin viiden vuoden välein tehtävä uusi laserkeilaukseen perustuva inventointi oli tulosten perusteella paras.

8. Johtopäätökset

Laserkeilausaineiston ja ilmakuvien sävyarvojen yhteiskäyttö tuotti tässä hankkeessa luotettavimmat puustotunnusennusteet. Erot eri kaukokartoitusaineistojen välillä eivät kuitenkaan olleet suuria. Ilmakuvien saatavuus 3D-tiedon tuottamiseksi on käytännössä kuitenkin huomattavasti haastavampaa kuin laserkeilauksen sääolosuhteiden vaikutusten takia, joten laserkeilausta pidetään metsävaratiedon tuottamisessa parempana ratkaisuna. Tätä tukevat lisäksi lähes valmiit suunnitelmat seuraavasta kansallisesta laserkeilausohjelmasta.

Hankkeessa tehtyjen haastattelujen pohjalta on ilmeistä, että tarkinkaan tutkituista kaukokartoitusmenetelmistä ei täyty kaikkia metsävaratiedolle asetettavia vaatimuksia (Kangas & Packalen 2018). Esimerkiksi taimikoiden osalta maastossa arvioituja tietoja pidettiin täysin välttämättöminä, eikä tilanteen odotettu paranevan lähiaikoina. Myös puulajiosuuksien, puuston laadun ja järeysjakaumien osalta tavoitelluista tiedon laatuvaatimuksista jäätettiin selvästi. Tämäkin puoltaa laserkeilauksen käyttöä tiedon tuotannossa myös jatkossa. Lisäksi tarvitaan tutkimuksia siitä, minkälaisilla lisämittauksilla (tai teknologian kehittyessä uudentyypisillä kaukokartoitusaineistoilla) olisi mahdollista saada kustannustehokkaasti vaativimmatkin laatuvaatimukset täyttävät metsävaratiedot.

Kasvumalleilla päivittäminen lisäsi puustoennusteiden harhaa. Näin ollen viiden vuoden välein tehtävä laserkeilausinventointi lisäsi esimerkkitilalta saatavia hyötyjä 56€/ha verrattuna kasvumalleilla päivittämiseen ja viiden vuoden inventointikiertoa voidaankin pitää optimaalisena. Uudessa laserkeilausohjelmassa on suunniteltu kuuden vuoden inventointikierto, joka näiden tulosten valossa on selkeästi parempi kuin perinteisesti käytössä ollut 10 vuoden välein tehtävä inventointi. Tässä hankkeessa tutkittu seitsemän vuoden inventointikierto pienensi metsänomistajan mahdollisia tuloja viiden vuoden kiertoon verrattuna. Näin ollen suunniteltujen laserkeilausinventointien väliä ei ole suositeltavaa kasvattaa suunnitellusta kuudesta vuodesta.

Koealojen sijoittelutavalla ei ollut merkittävää vaikutusta metsänomistajan saamaan hyötyyn. Tässä mielessä myös eri tavalla sijoiteltuja koealoja voitaneen hyödyntää inventoinnissa, erityisesti kun käytetään lasertunnuksiin perustuvaa koealojen kattavuustarkastelua. Koealojen määrällä oli sen sijaan suuri merkitys. Vaikka 200 koealan jälkeen lisäkoealojen hyöty vähenee merkittävästi, menetetyt hyödyn näkökulmasta on perusteltua mitata huomattavasti enemmän koealoja. Lisäkoealan mittaamisesta saatava hyöty on 200 000 hehtaarin inventointialueella vielä 500 koealan jälkeen yli 3000 euroa.

Viitteet

- Coote, A., Knight, P., T.S. Colding, Home, R., Fröjdenlund, J., Lysell G., Streilein, A., Kane, P., Brady, K., Wozniak, P., Plá, M., Bayers, E., Ilves, R., Tuokko, J., Rijsdijk, M., Witmer R., Cantat, F., Crompvoets, J., Stoter, J. (2017). Assessing the Economic Value of 3D Geo-Information. European Spatial Data Research. Official Publication 68.
http://www.eurosd.net/sites/default/files/uploaded_files/pub68_economicvalue-3d-geo-information_final_v1.pdf
- Duvernoy, K., Barth, A., and Wallerman, J. (2007). Evaluating sample plot imputation techniques as input in forest management planning. *Canadian journal of forest research*, 37(11): 2069–2079.
- Eid, T., Gobakken, T. and Næsset E. (2004). Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analysis. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 512-523.
- Forney, W.M., Raunihar, R.P., Bernknopf, R.L., and Mishra, S.K. (2012). An economic value of remote-sensing information— Application to agricultural production and maintaining groundwater quality: U.S. Geological Survey Professional Paper 1796, 60 p., available at <http://pubs.usgs.gov/pp/1796/>
- Grafström, A., Lundström, N. L., and Schelin, L. (2012). Spatially balanced sampling through the pivotal method. *Biometrics*, 68(2): 514–520.
- Haara, A. and Korhonen, K. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Haara, A., Kangas, A. (2018). Puulajiosuuksien virheiden vaikutus puukaupan hintakilpailutuksessa. *Käsikirjoitus*.
- Haara, A., Kangas, A., Tuominen, S. (2018). Tree species proportions and site index as an error source in forest management planning. [Submitted manuscript].
- Holmström, H., Kallur, H., and Ståhl, G. (2003). Cost-plus-loss analyses of forest inventory strategies based on kNN-assigned reference sample plot data. *Silva Fennica*, 37(3): 381–398.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyytiäinen, K., Bayazidi, S., Pietilä, I. (2010). Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. *Forest Policy and Economics* 12(5): 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.02.009>
- Kaihlanen, J. (2017). Kemerahankkeista paljastui ennätysmäärä puutteita: Kolmannes hehtaareista ei täyttänyt rahoitusehtoja. *Maaseudun Tulevaisuus* 28.6.2017.
- Kangas, A. & Packalen, T. (2018). Metsävaratieto metsäalan toimijoiden päätöksenteossa – käyttötapaukset ja hyötyyn vaikuttavat tekijät. *Metsätieteen Aikakauskirja* 4/2018.
- Kangas A., Gobakken, T., Puliti, S., Hauglin M., and Næsset E. (2018a). Value of airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry data in forest decision making. *Silva Fennica* 52(1) article id 9923. 19 p. <https://doi.org/10.14214/sf.9923>
- Kangas, A., Astrup, R., Breidenbach, J., Fridman, J., Gobakken, T., Korhonen, K.T. Maltamo, M., Nilsson, M., Nord-Larsen, T., Næsset, E & Olsson, H. (2018b). Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future. *Scandinavian Journal of Forest Research*. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1416666>
- Kangas, A. (2010). Value of forest information. *European Journal of Forest Research* 129:863-874. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0281-7>
- Kauppalehti (2018). Tulosanalyysi: UPM on parantanut osavuosituloksiaan jo viisi vuotta putkeen. <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/tulosanalyysi-upm-on-parantanut-osavuosituloksiaan-jo-viisi-vuotta-putkeen/8aa6e2ca-1015-31f3-a656-ff4230ff18e5> [Viitattu 12.12.2018]
- Kukkonen, M., Korhonen, L., Maltamo, M., Suvanto, A. ja Packalen, P. (2018). How much can airborne laser scanning based forest inventory by tree species benefit from auxiliary optical data? *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 72: 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.017>

- Kukkonen, M., Maltamo, M., Korhonen, L. ja Packalen, P. (2018). The comparison of multispectral airborne laser scanning and stereo matching of aerial images as a single sensor solution to forest inventory by tree species. Käsikirjoitus.
- Kukkonen, M., Maltamo, M. and Packalen, P. (2017). Image matching as a data source for forest inventory - comparison of Semi-Global Matching and Next-Generation Terrain Extraction algorithms in a typical managed boreal forest environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 60: 11–21.
- Laasasenaho, J. (1982). Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108: 1–74.
- Laser2020. <http://kmtk.paikkatietoalusta.fi/projektit-ja-tyopakettit/laser2020> [viitattu 21.11.2018]
- Luoma, V., Vastaranta, M., Eyvindson, K., Kankare, V., Saarinen, N., Holopainen, M., Hyyppä, J. (2017). Errors in the short-term forest resource information update. *The Rise of Big Data*. Springer. pp. 155–166.
- Luoma, V., Saarinen, N., Kankare, V., Yu, X., Honkavaara, E., Viitala, R., Holopainen, M., Hyyppä, J., Vastaranta, M. 2019. Assessing reliability of forest resource information - updating with growth models or new inventory using remote sensing? Käsikirjoitus.
- Niemi, P. (2018). Laserkeilattu metsävaratieto metsänhoidon toimenpiteiden edistäjänä. Pro gradutyö, Helsingin yliopisto.
- Næsset, E. (2002). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote sensing of environment*, 80: 88–99.
- Niskanen Y. (2003). Metsäsuunnitelman vaikutus taimikonhoitopäätökseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2003: s. 301–319. <https://doi.org/10.14214/ma.6799>
- Niskanen Y. (2004). Metsäsuunnitelman vaikutus ensiharvennuspäätökseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2004: s. 237–254. <https://doi.org/10.14214/ma.6220>
- Packalén, P., and Maltamo, M. (2007). The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote sensing of Environment*, 109: 328–341.
- Ruotsalainen, R., Pukkala, T., Kangas A., Vauhkonen, J., Tuominen S., Packalen P. (2018). The effects of sample plot selection strategy and the number of sample plots on inoptimality losses in ALS-based forest management planning. [Submitted manuscript].
- Sawyer, G., Dubost, A. & de Vries M. (2016). Copernicus Sentinels' Products Economic Value: A Case Study of Forest Management in Sweden. *European Association of Remote Sensing Companies*. 51 p. available at <http://earsc.org/news/copernicus-sentinels-products-economic-value-study>.
- Tomppo E. (1993). Multi-source national forest inventory of Finland. In: Nyyssönen A., Poso S., Rautala J. (eds.). *Proceedings of Ilvessalo Symposium on National Forest Inventories, 17–21 Aug. 1992, Finland*. The Finnish Forest Research Institute Research Papers 444: 52–60.
- Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O., Katila, M. (2008). Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases. *Remote Sensing of Environment* 112: 1982–1999.
- Tomppo, E., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Ihalainen, A., Katila, M., Mäkelä, H., Tuomainen, T., Vainikainen, N. (2011). *Designing and conducting a forest inventory - case: 9th National Forest Inventory of Finland*. Springer, *Managing Forest Ecosystems* 21. 270 p.
- Tomppo, E., Kuusinen, N., Mäkisara, K., Kalital, M. & McRoberts, R.E. (2016). Effects of field plot configurations on the uncertainties of -assisted forest resource estimates. *Scand. J. For. Res* pp. 1–13 <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2016.1259425>
- Wallenius, T., Laamanen, R., Mehtätalo, L., Kangas A. & Peuhkurinen, J. 2012. Analysing the agreement between an Airborne Laser Scanning based forest inventory and a control inventory – a case study in Metsähallitus Kuhmo-district in Eastern Finland. *Silva Fennica* 46: 111–129.
- Tuominen, S., Balazs, A., Honkavaara, E., Pölonen, I., Saari, H., Hakala, T., Viljanen, N. (2017). Hyperspectral UAV-imagery and photogrammetric canopy height model in estimating forest stand variables. *Silva Fenn.* 51, article id 7721. <https://doi.org/10.14214/sf.7721>. [Uuttera](https://doi.org/10.14214/sf.7721)



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000