

Mikko Niemi, Mikko Vastaranta, Jussi Peuhkurinen ja Markus Holopainen

Heikkotuottoisten ojitettujen soiden puustoinventointi Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa hyödyntäen

Seloste artikkelista: Niemi, M., Vastaranta, M., Peuhkurinen, J. & Holopainen, M. 2015. Forest inventory attribute prediction using airborne laser scanning in low-productive forestry-drained boreal peatlands. *Silva Fennica* 49(2), article id 1218.

<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1218>

Metsänkasvatukseen soveltumattomien, kitumaiksi luokiteltavien ojitettujen turvemaiden uudistamisvelvoite poistettiin metsälaista vuoden 2014 alussa. Valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan lakimuutos koskee 579 000 hehtaarin suopinta-alaa, jolla puuston keskimääräinen vuotuinen kasvu on alle $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Yhtenä kyseisten alueiden jatkokäyttövaihtoehtona on esitetty ojituksen myötä syntyneen puuston korjaamista bioenergiaksi, minkä jälkeen alueet rajattaisiin metsätaloudeksi ulkopuolelle palautumaan kohti luonnontilaisen kaltaista suoekosysteemiä.

Jos metsäteollisuuden puunkorjuuta aletaan kohdentaa myös karuihin ojitettuihin suometsiin, niistä tarvitaan nykyistä tarkempaa metsävaratietoa puunkorjuun suunnittelua ja kustannuslaskentaa varten. Aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin tarkkuutta ei ole kuitenkaan aiemmin selvitetty näin vähäpuusuisilla kohteilla, eikä puustotulkintaan tarvittavia referenssikoealoja tyypillisesti mitata lainkaan kitumailta. Selvitimme Metsähallituksen toimeksiannosta seuraavat keskeiset tutkimuskysymyk-

set: 1) kuinka tarkasti metsikkötunnukset (puuston tilavuus, pohjapinta-ala, runkoluku, keskiläpimitta, keskipituus ja lehtipuuston osuus) voidaan arvioida heikkotuottoisista suometsistä metsämaan koeala-aineistoa ja Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa hyödyntäen, sekä 2) kuinka paljon inventoinnin tarkkuus paranee, kun koealaotantaa kohdennetaan myös kitumaasoille.

Tutkimusalueeksi valittiin Haapajärven alue Pohjois-Pohjanmaalta, josta oli saatavissa Maanmittauslaitoksen keräämä harvapulssinen laserkeilausaineisto ja Suomen metsäkeskuksen puustotulkintaa varten mittaama 799 referenssikoealan aineisto vuodelta 2012. Koealaotanta oli kohdennettu metsämaille, joten se vastasi tyypillistä yksityismetsien inventointiin kerättävää maastoaineistoa. Tätä tutkimusta varten koeala-aineistoa täydennettiin heikkotuottoisilta ojitetuilta soilta syksyllä 2013 mitatuilla 53 koealalla.

Puustotulkinta tehtiin laskemalla referenssikoealoille tyypillisiä aluepohjaisessa laserkeilausinventoinnissa käytettyjä selittäviä muuttujia laserkeilauslaitoksen tuottaman 3D-pistepilven korkeusjakaumasta. Metsikkötunnukset ennustettiin k :n lähimmän naapurin menetelmällä, jossa naapurit etsittiin *random forests* -tekniikalla. Ennustettujen metsikkötunnusten koealatason (pinta-ala 254 m^2) tarkkuutta arvioitiin ristiinvalidoimalla. Heikkotuottoisilta ojitetuilta soilta mitattujen lisäkoealojen vaikutusta inventoinnin tarkkuuteen tarkasteltiin erikseen kitumaiksi luokiteltavissa ojitetuissa suometsissä, nuorissa kasvatusmetsissä ja varttuneissa metsissä.

Kun inventointi toteutettiin jäljittelemällä Suomen metsäkeskuksen nykyistä inventointijärjestelmää ja valitsemalla puustotulkinnan opetusaineistoon pelkästään 500 metsämailta mitattua koealaa, ojitettujen kitumaasoiden puusto yliarvioitiin systemaattisesti. Puuston kokonaistilavuuden ennusteille havaittiin $13,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) ja $-11,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ harha. Kun opetusaineistoon lisättiin 30 ojitetuilta kitumaasoilta mitattua koealaa,

tulokset paranivat merkittävästi, sillä RMSE ja harha olivat tällöin $10,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ja $-3,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Kitumaasoiden vallitsevana puulajina on yleensä joko mänty tai hieskoivu, ja näissä tapauksissa pääpuulaji luokiteltiin oikein 87 % tarkkuudella. Taulukossa 1 on eritelty, millä tarkkuudella eri metsikkötunnukset onnistuttiin arvioimaan mänty- ja hieskoivuvaltaisilla kohteilla.

Ojitettujen kitumaasoiden ja nuorten kasvatusmetsien metsikkötunnukset ovat usein puuston ikää lukuun ottamatta lähellä toisiaan, joten kitumailta mitattujen koealojen lisääminen aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin opetusaineistoon olisi saattanut aiheuttaa virheitä nuorten kasvatusmetsien puustotulkintaan. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin, että laserkeilausaineiston korkeusjakaumasta laskettujen piirteiden avulla kyseiset kohteet voidaan erotella toisistaan varsin hyvin, sillä kitumailta selvästi suurempi osa laserkeilausalan paluukaiuista havaitaan maanpinnasta verrattuna nuorista kasvatusmetsistä kerättyyn aineistoon. Koealaotannan laajentaminen ei näin ollen vaikuttanut inventoinnin tarkkuuteen metsämaalla.

Yhteenvedona voidaan todeta, että harhattoman metsävaratiedon kerääminen kitumailta laserkeilausta hyödyntäen edellyttää referenssikoealojen mittaamista kyseisistä kohteista. Kun tyypilliseen Suomen metsäkeskuksen koealaotukseen lisättiin 30 kitumaakoealaa, puuston tilavuusestimaattien RMSE pieneni 27 %. Kun lisäkoealojen määrää kasvatettiin 30:sta 58:aan, vastaava kehitys oli enää 9 %. Optimaalinen lisäkoealojen määrä on aina arvioitava tapauskohtaisesti tarkastelemalla parantuneista metsävaratiedoista saatavaa hyötyä suhteessa inventoinnin lisäkustannuksiin.

■ MMM Mikko Niemi, MMT Mikko Vastaranta & Prof. Markus Holopainen, Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos; MMT Jussi Peuhkurinen, Arbonaut Oy
Sähköposti mikko.t.niemi@helsinki.fi

Taulukko 1. Puuston keskipituuden (h_g), keskiläpimitan (d_g), runkoluvun (N), pohjapinta-alan (G) ja tilavuuden (V) koealatasen estimointitarkkuus mänty- ja hieskoivuvaltaisilla ojitetuilla kitumaasoilla, kun puustotulkinnan opetusaineistona käytettiin 500 metsämailta ja 30 ojitetuilta kitumaasoilta mitattua referenssikoealaa.

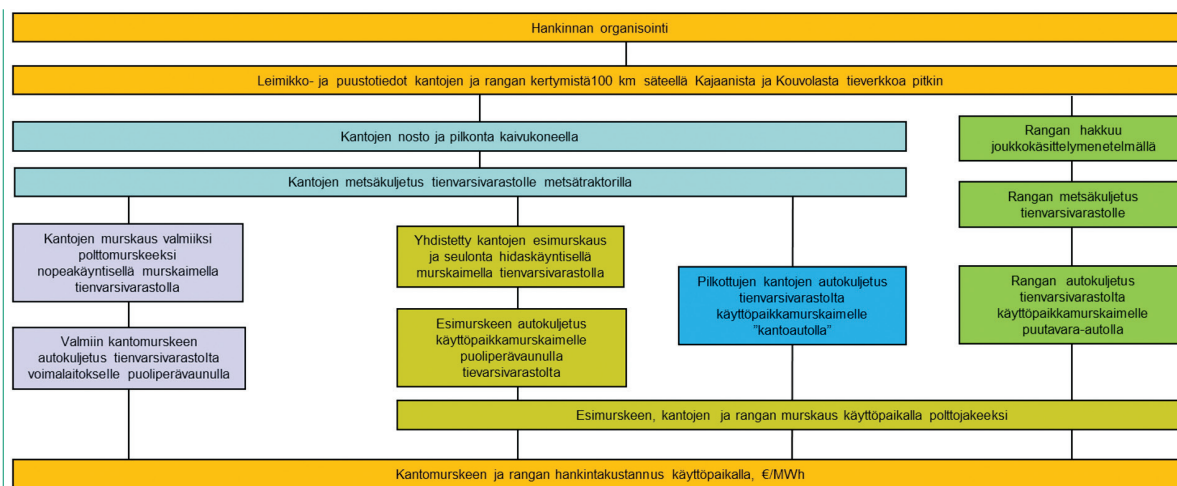
	RMSE	RMSE %	harha	harha %
Mäntyvaltaiset ojitetut kitumaasuot (37 kpl)				
h_g , m	1,0	13	0,2	2,1
d_g , cm	2,1	21	0,4	4,4
N , ha^{-1}	298	60	-116	-23
G , $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$	1,5	46	-0,4	-12
V , $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	8,9	59	-2,3	-15
Hieskoivuvaltaiset ojitetut kitumaasuot (18 kpl)				
h_g , m	1,4	13	0,4	4,1
d_g , cm	1,9	16	0,5	4,4
N , ha^{-1}	377	63	-133	-22
G , $\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$	2,1	46	-0,7	-15
V , $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	12,4	49	-5,2	-21

Juha Laitila, Tapio Ranta, Antti Asikainen, Eero Jäppinen & Olli-Jussi Korpinen

Kantojen kustannuskilpailukyky metsähakkeen hankinnassa Etelä- ja Pohjois-Suomessa

Seloste artikkelista: Laitila, J., Ranta, T., Asikainen, A., Jäppinen, E. & Korpinen, O.-J. (2015). The cost competitiveness of conifer stumps in the procurement of forest chips for fuel in Southern and Northern Finland. *Silva Fennica* 49(2), article id 1280.
<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1280>

Tutkimuksessa selvitettiin kantomurskeen tuotantokustannuksia eri toimitusketjuilla työvaiheittain ja saatuja tuloksia verrattiin rankahakkeen tuotantokustannuksiin. Erityistä huomiota kiinnitettiin tuotetun polttomurskeen laatuun ja lämpöarvoon. Paikkatietoaineistoihin perustuvat laskelmat teh-



Kuva 1. Kantomurskeen ja rankahakkeen toimitusketjut ja eri työvaiheet

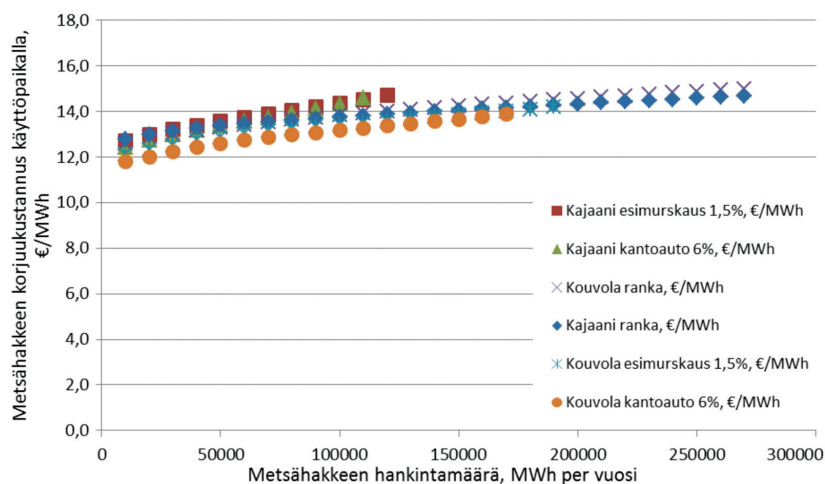
tiin Kouvolassa ja Kajaanissa sijaitseville käyttöpaikoille ja hankinta-alueen säde oli 100 kilometriä tieverkkoa pitkin. Kantojen kertymä- ja korjuukustannuslaskelmat perustuivat kuusivaltaisten päätehakkuiden leimikkotietoihin. Rangan kertymät ja korjuukustannukset nuorista kasvatusmetsistä laskettiin puolestaan Valtakunnan metsien 9. inventoinnin (VMI9) koelatietojen pohjalta. Kantojen noston, hakkuun ja metsäkuljetuksen, samoin kuin kaukokuljetuksen ja murskauksen tuottavuudet perustuivat aiemmin julkaistuihin ajanmenekkimalleihin tai tutkimuksiin. Koneiden ja ajoneuvojen käytötuntikustannukset laskettiin tässä tutkimuksessa.

Toimitusketjulaskelmassa kannot nostettiin kaivukoneella ja paloitellut kannot ajettiin tienvarsivarastolle metsätraktorilla. Kantojen murskaus poltohakkeeksi tapahtui joko tienvarsivarastolla tai käyttöpaikalla (kuva 1). Tienvarsivarastolla kannot murskattiin kuorma-autoalustaisella murskaimella ja valmis kantomurske kuljetettiin käyttöpaikan vastaanottiin puoliperävaunuilla. Käyttöpaikkamurskaukseen perustuvassa menetelmässä kannot ajettiin käyttöpaikkamurskaimelle perävaunullisella puutavara-autolla, jonka kuormatilassa oli katettu pohja ja laidat. Toinen vaihtoehto oli esimurskata ja seuloa kannot puhtaaksi maa-aineksesta tienvarsivarastolla ja ajaa esimurske puoliperävaunuilla käyttöpaikkamurskaimelle, jossa esimurske murskattiin lopulliseen palakokoon (kuva 1).

Rangat hakattiin joukkokäsittelylaittein varustellulla keskiraskaalla hakkuukoneella ja ajettiin tienvarsivarastolle metsätraktorilla (kuva 1). Tienvarsivarastolta rangat kuljetettiin perävaunullisella puutavara-autolla käyttöpaikalle, jossa rankakuorma purettiin suoraan käyttöpaikkamurskaimen kuljettimelle.

Vertailulaskelmassa rangan kosteus oli 40 % ja kantomurskeen 31 %. Kannoissa olevan maa-aineksen vaikutus lämpöarvoon huomioitiin niin, että kantojen esimurskaukseen ja seulontaan perustuvalla toimitusketjulla kantomurskeen tuhkapitoisuuden oletettiin olevan 1.5 % tai 6.0 %. Kantojen tienvarsimurskaukseen perustuvassa toimitusketjussa maa-aineksen varisemista edistäviä työvaiheita on varsin vähän, joten kantomurskeen tuhkapitoisuudeksi oletettiin 6.0 %, 12.0 % tai 18.0 %. Kantojen käyttöpaikkamurskaukseen perustuvassa toimitusketjussa autokuljetus sekä kantojen kuorma ja purku edistävät maa-aineksen varisemista, joten kantomurskeen tuhkapitoisuudeksi oletettiin 1.5 %, 6.0 % tai 12.0 %.

Kantojen tekninen korjuupotentiaali Kajaanin ympäristön kuusivaltaisilla päätehakkuilla oli 54 000 m³ vuodessa ja rangan tekninen korjuupotentiaali nuorista kasvatusmetsistä oli 268 000 m³ vuodessa. Vastaavat korjuupotentiaalit Kouvolan ympäristössä olivat 84 000 m³ kannoille ja 295 000 m³ rangalle. Energiasisällön mukaan kantojen tekninen korjuu-



Kuva 2. Kantomurskeen ja rankahakkeen korjuukustannukset Kajaanissa ja Kouvolassa (€ MWh^{-1}) kun kantomurskeen tuhkapitoisuus on 1.5 % tai 6.0%.

potentiaali oli kantomurskeen tuhkapitoisuudesta riippuen 125 000–97 000 MWh vuodessa Kajaanissa ja 193 000–151 000 MWh vuodessa Kouvolassa. Vastaavasti rangan tekninen korjuupotentiaali oli energiasisällön mukaan 600 000 MWh Kajaanissa ja 644 000 MWh Kouvolassa.

Vertailulaskelman tulokset korostivat kantomurskeen laadun ja epäpuhtauksien poiston merkitystä kantomurskeen tuotannossa. Kantojen tienvarressa murskaukseen perustuvan toimitusketjun kustannukset olivat samalla tasolla kantojen esimurskaukseen ja seulontaan perustuvan toimitusketjun kanssa, kun kustannukset laskettiin kiintokuutiometriä kohden (€ m^{-3}), mutta selvästi korkeammat, kun kustannukset laskettiin käyttöpaikeille toimitetun kantomurskeen energiasisällön mukaan (€ MWh^{-1}). Esimurskaukseen yhdistetty seulonta on tehokas ja varma tapa varmistaa kantomurskeen laatu, mutta em. toimitusketjun kustannukset olivat pilkottujen kantojen käyttöpaikeammurskaukseen perustuvaa menetelmää kalliimmat, kun käyttöpaikeilla murskattavien kantojen tuhkapitoisuus oli alle 6 % (kuva 2).

Kantomurskeen korjuukustannus käyttöpaikeilla oli Kouvolassa noin 1 € MWh^{-1} alempi kuin Kajaanissa (kuva 2). Kouvolassa sekä kantojen koko että kertymä olivat Kajaania suuremmat, mikä selittää eron käyttöpaikekustannuksissa. Nuorista kasvatusemetsistä korjattavan rangan korjuukustannukset olivat samalla tasolla molemmilla käyttöpaikeilla. Rankahakkeeseen verrattuna kantomurskeen korjuukustannukset olivat Kouvolassa 0.5 € MWh^{-1} pienemmät ja Kajaanissa 0.6 € MWh^{-1} suuremmat. Kantojen kuljetuskustannukset ovat rangan kuljetuskustannuksia korkeammat, minkä vuoksi kantojen suhteellinen kustannuskilpailukyky on suurimmillaan alueilla, joissa kantojen alueelliset kertymät ovat suuret ja keskikuljetusmatkat käyttöpaikeille lyhyet.

■ Juha Laitila & Antti Asikainen: Luonnonvarakeskus, Joensuu;
 Tapio Ranta, Eero Jäppinen & Olli-Jussi Korpinen: Lappeenrannan teknillinen yliopisto
 Sähköposti: juha.laitila@luke.fi

Lauri Korhonen, Daniela Ali-Sisto ja Timo Tokola

Trooppisen metsän latvuspeittävyyden estimointi satelliittikuvien ja laserkeilauspohjaisen referenssiaineiston avulla

Seloste artikkelista: Korhonen L., Ali-Sisto D. & Tokola T. (2015). Tropical forest canopy cover estimation using satellite imagery and airborne lidar reference data. *Silva Fennica* 49(5), article id 1405. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1405>

Suuralueiden metsänarvioinnin tutkimuksessa ovat viime aikoina korostuneet tutkimusasetelmat, joissa maastokoealojen ja satelliittikuvien ohella käytetään välvaiheena yksittäisiä laserkeilauslinjoja. Laseraineisto ei siis näissä tapauksissa kata koko inventointialuetta, vaan sen avulla voidaan luoda suuri määrä uusia laserkoealoja varsinaisten maastokoealojen lisäksi. Koska metsän latvuspeittävyys voidaan yleensä estimoida suoraan laserkeilausaineistosta melko suurella tarkkuudella, linjoitaita laserkeilausaineistoa voidaan käyttää apuna latvuspeittävyttä ja metsäpinta-alaa kuvaavien satelliittikarttojen laadinnassa. Tutkimuksen tavoitteena oli käyttää laserkeilauslinjoilta suoraan estimoitua latvuspeittävyttä vastemuuttujana laadittaessa latvuspeittävyysmalleja ALOS AVNIR-2-satelliittikuvan sävyarvoista lasketuilla kasvillisuusindekseillä, ja arvioida näin saatujen latvuspeittävyyskarttojen tarkkuutta. Myös metsäpinta-alaa mallinnettiin kahdella eri tavalla perustuen 20 % latvuspeittokriteeriin: suoraan käyttäen erillistä mallia, ja muuntamalla jatkuvat latvuspeittoennusteet metsäalaksi.

Satelliittipohjaista mallia sovellettiin latvuspeittävyyden ennustamiseksi koko laseraineiston kattamalle alueelle ja tuloksena saatua karttaa verrattiin suoraan laserkeilauksella saatuun karttaan. Kooltaan noin 34 × 23 km:n tutkimusalue sijaitsi Savannakhetin provinssissa Laosissa alueella, joka sisältää sekä ikivihreitä sademetsiä että *Dipterocarpus*-suvun puulajien muodostamia talvisin osin lehdetöntä metsiä. Alue on osin luonnontilainen, mutta ihmisen aiheuttama metsäkato ja metsien laadun huononeminen ovat kasvavia ongelmia.

Latvuspeittävyysmallit laadittiin R-ohjelman avulla käyttäen uudehkoa mallinnustekniikkaa, jonka nimi on nolla- ja yksi-inflatoitu beta-regressio (*zero-and-one inflated beta regression*), joka soveltuu hyvin tilanteisiin, missä vastemuuttuja rajoittuu välille 0–1 ja sisältää myös kyseisiä ääriarvoja. Mallinnus toistettiin metsäpinta-alalle käyttäen logistista regressiota. Validointiaineistona toiminut laserpohjainen latvuspeittävyyskartta koostui yhteensä 409 217 pikselistä, joiden koko oli 30 × 30 m. Tulokset osoittivat selkeän riippuvuuden satelliittikuvan sävyarvojen ja latvuspeittävyyden välillä (absoluuttinen keskineliövirhe = 12.8 %, $R^2=0.82$). Metsäpinta-alan estimoinnissa suora mallinnus logistisella regressiolla tuotti paremman tuloksen (kappa-kerroin = 0.61) kuin beta-regressiolla estimoidun latvuspeittokartan muuntaminen metsäalakartaksi (kappa = 0.53). Mallinnusaineistona käytettävien laserkeilauslinjojen valinnalla on suuri vaikutus mallinnuksen lopputulokseen. Tässä tapauksessa alhaisen latvuspeittävyyden koealoja osui mallinnusaineistoon liian vähän, mikä heikensi beta-regressiomallien tarkkuutta lähellä tärkeää 20 %:n latvuspeittävyysrajaa. Tutkimuksessa esitetty menetelmä tarjoaa edullisen ja varsin luotettavan tavan latvuspeittävyyden ja metsäpinta-alan mallittamiseksi suurillekin alueille.

■ Lauri Korhonen, Daniela Ali-Sisto ja Timo Tokola
Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto
Sähköposti lauri.korhonen@uef.fi

