

Eetu Kotivuori, Lauri Korhonen ja
Petteri Packalen

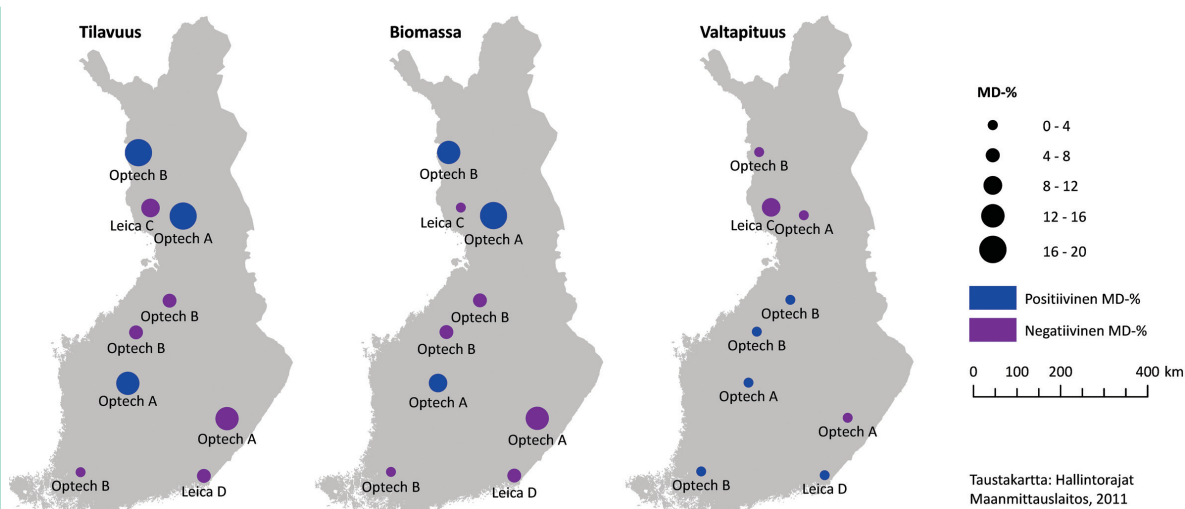
Suomen valtakunnalliset laserkeilauspohjaiset puuston tilavuus-, biomass- ja valtapituusmallit

Seloste artikkelista: Kotivuori, E., Korhonen, L., Packalen, P. (2016). Nationwide airborne laser scanning based models for volume, biomass and dominant height in Finland. *Silva Fennica* vol. 50 no. 4 article id 1567. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1567>

Laserkeilaukseen perustuva metsävarojen inventointi on ollut laajalti tutkittu aihepiiri viimeisen vuosikymmenen ajan. Suomessa erityisesti laserkeilaukseen perustuvaa aluepohjaista menetelmää on sovellettu monissa käytännön laserkeilausprojekteissa. Aluepohjaisessa menetelmässä puustotunnusten empiiriset mallit sovitetaan maastossa mitattujen koelatietojen ja laserkeilausaineistosta laskettujen tunnusten välille. Muodostettujen mallien avulla puustotiedot voidaan ennustaa koko inventoitavalle alueelle. Koealojen mittaus on kuitenkin kallista ja aikaa vievää. Näin ollen voisikin olla houkuttelevaa yhdistää koealoja useammalta erilliseltä inventointialueelta tai hyödyntää aikaisemman inventointiprojektin koealoja uuden alueen inventoinnissa. Koeala-aineistojen yhdistäminen eri inventointiprojektien välillä ei ole kuitenkaan aivan suoraviivaista, sillä metsien rakenne vaihtelee huomattavasti eri alueiden välillä. Myös eri keilainyksilöillä hankittujen laserkeilausaineistojen yhdistäminen aiheuttaa usein ongelmia. Eri keilainyksilöillä tuotettujen aineistojen ja näistä johdettujen korkeutta ja tiheyttä kuvaavien tunnusten välillä on huomattu olevan selvää vaihtelua riippuen käytetystä keilainyksilöstä. Tämän

tutkimuksen tarkoituksena oli saada selville kuinka tarkkoja ennusteita on mahdollista saavuttaa, jos runkotilavuutta, maan yläpuolista biomassaa ja valtapituutta ennustetaan yleisillä laserkeilausmallilla perinteisten aluekohtaisten mallien sijaan.

Yleiset laserkeilausmallit sovitettiin käyttäen koealoja yhdeksältä inventointialueelta (2011–2013) eri puolilta Suomea. Aineisto käsitti kaiken kaikkiaan 6230 koealaa. Maastoaineistot saatiin suoraan Suomen Metsäkeskukselta ja laserkeilausaineistot TerraTec:ltä ja Blom Kartalta. Inventointialueiden laseraineistot oli hankittu käyttäen kahta keilainmerkkiä (Leica ja Optech) ja yhteensä neljää eri keilainyksilöä (A–D). Laserkeilausperusteiset mallit sovitettiin maastossa mitattujen koelatietojen ja koealoille laskettujen laserkeilaustunnusten välille OLS-estimoinnin (*Ordinary Least Squares*) avulla. Yleiset mallit sovitettiin kaikilla mahdollisilla selittäjäkombinaatiolla ja lopullinen mallin muoto valittiin pienimmän RMSE:n (*Root Mean Square Error*; pienimmän keskineliövirheen neliöjuuri) perusteella. Kaikille inventointialueille muodostettiin myös aluekohtaiset laserkeilausmallit samalla mallinuseriaatteella. Yleisten ja aluekohtaisten mallien vertailu toteutettiin ristiinvalidoinnin (”jätä-yksi-inventointialue-pois” vs. ”jätä-yksi-koeala-pois”) ja ristiinvalidoinnin tuloksista laskettujen RMSE- ja MD- (*Mean Difference*; erojen keskiarvo) arvojen avulla. MD-arvo kuvaa, kuinka paljon todelliset havainnot eroavat keskimäärin mallin ennusteista (vastaa perinteistä harhan määritelmää). Lopuksi yleiset mallit myös kalibroitiin käyttäen hyödyksi yleisten mallien sekamallisovitusta. Kalibrointi suoritettiin ennustamalla sekamallin satunnaisosat niin kutsutun BLUP-estimaattorin (*Best Linear Unbiased Predictor*) avulla, hyödyntäen ”jätä-yksi-inventointialue-pois”-ristiinvalidointia. Kalibrointiin valittiin satunnaisesti 20 koealaa ja sitä toistettiin yhteensä 10 000 kertaa. Kalibrointikierron RMSE- ja MD-keskiarvoja vertailtiin yleisten mallien ristiinvalidoinnissa saatuihin tuloksiin.



Kuva 1. Havaittujen ja yleisillä malleilla ennustettujen arvojen keskimääräisten erojen (MD-%) vaihtelu eri alueiden ja keilainyksilöiden välillä.

Suomen yleiset laserkeilausmallit ovat:

$$\sqrt{V} = 0,7622 + 3,3582 \times \sqrt{havg_F} + 0,0100 \times h95_L^2 \quad (1)$$

$$\sqrt{M_t} = -0,4247 + 0,1494 \times h \max_L + 2,5196 \times \sqrt{havg_F} \quad (2)$$

$$H_{DOM} = 3,1475 + 0,9855 \times h95_F \quad (3)$$

jossa V =tilavuus (m^3/ha), M_t =biomassa (t/ha), H_{DOM} =valtapiuus (m), $havg_F$ =ensimmäisten kaikujen keskiarvo, $h95_L$ =viimeisten kaikujen 95%:n korkeuskvartiili, $h95_L$ =viimeisten kaikujen 95%:n korkeuskvartiili ja $h \max_L$ =viimeisten kaikujen suurin korkeusarvo. Vastemuuttujan neliöjuurimuunnoksesta aiheutuvan harhan korjaukseen tarvittavat tilavuus- ja biomassamallien jäännösvarianssit ovat 2,0923 ja 1,1161.

Yleisten tilavuus- ja biomassamallien ennusteet olivat suhteellisen tarkkoja verrattuna aluekohtaisten mallien ennusteisiin, varsinkin maan eteläosissa. Yleisen tilavuusmallin RMSE vaihteli 23,0–32,9%:n välillä (pohjoisessa keskimäärin 30,9% ja etelässä 26,8%), aluekohtaisten mallien RMSE:n vaihdellissa 21,7–26,8%:n välillä (pohjoisessa 23,0%, etelässä 24,6%). Vastaavat vaihteluvälit biomassalle olivat 22,3–33,8% (pohjoisessa 31,2%, etelässä 26,3%) ja 20,2–25,4% (pohjoisessa ja ete-

lässä 23,2%). Yleisten tilavuus- ja biomassamallien ongelmana kuitenkin on, että todelliset havainnot eroavat keskimäärin yleisten mallien ennusteista, erityisesti maan pohjoisosissa. Yleisen tilavuusmallin MD vaihteli –13,2–18,2%:n välillä (absoluuttinen keskiarvo pohjoisessa 14,6% ja etelässä 7,3%). Vastaava vaihteluväli biomassalle oli –13,8–18,7% (pohjoisessa 11,4% ja etelässä 7,9%). Yleisen valtapiuusmallin ennusteet olivat lähes yhtä tarkkoja (RMSE 5,4–7,7%, keskiarvo 6,4%) kuin aluekohtaisten mallien (RMSE 5,2–6,7%, keskiarvo 6,0%). Keskimääräiset erot yleisen mallin ennusteisiin eivät myöskään olleet kovin suuria (MD –2,0–2,8%, absoluuttinen keskiarvo 1,3%). Ainoa poikkeus oli Tornion alue, jonka RMSE oli 11,4% ja MD –9,1%.

Kuvassa 1. on esitetty tilavuuden, biomassan ja valtapiuuden MD-arvojen vaihtelu eri inventointialueiden ja keilainyksilöiden välillä. Kuvasta voidaan havaita, että käytetyllä keilainyksilöllä on todennäköisesti yhteys MD:n suuruuteen. Esimerkiksi Optech-merkkisten keilainyksilöiden välisiä tilavuus- ja biomassan ennusteiden MD-arvoja vertailtaessa voitiin huomata, että käytettäessä keilainyksilöä ”B” keskimääräinen ero oli selvästi pienempi kuin käytettäessä keilainyksilöä ”A”. Kalibrointi paransi yleisten tilavuus- ja biomassamallien tarkkuutta huomattavasti. Kalibroinnin jälkeen yleisten tilavuus- ja biomassamallien RMSE:n vaihteluvälit

olivat 23,3–28,3 % (pohjoisessa ja etelässä 25,9 %) ja 21,9–29,0 % (pohjoisessa 27,7 % ja etelässä 24,8 %). Myös keskimääräiset erot lähenivät nollaa. Kalibroidun tilavuusmallin MD vaihteli $-2,3-3,9\%$:n (pohjoisessa 3,0 %, etelässä 1,2 %) ja biomassamallin $-2,8-4,3\%$:n (pohjoisessa 2,5 %, etelässä 1,4 %) välillä. Valtapituusmallien kohdalla kalibroinnilla ei ollut suurta vaikutusta, sillä ennusteet olivat pääsääntöisesti hyviä jo ennen kalibrointia.

Laserkeilausaineistosta johdetut tunnukset pystyvät kuvaamaan tilavuutta ja biomassaa melko hyvällä tarkkuudella huolimatta inventointialueiden välisistä metsien rakenteellisista vaihteluista. Yleisen valtapituusmallin ennusteet olivat lähes jokaisella alueella verrattavissa aluekohtaisten mallien tuloksiin. Myös eri keilainyksilöt vaikuttavat ennusteisiin, mutta niiden vaikutusta on erittäin vaikea ottaa huomioon. Ennusteet todennäköisesti paranisivat, jos mallit luotaisiin jokaiselle keilainyksilölle erikseen. Yleisten tilavuusmallien ennusteet olivat verrattavissa relaskoopiperusteiseen kuvioittaiseen arviointiin (jossa tilavuuden RMSE noin 25 %). On kuitenkin huomioitava, että yleisten mallien RMSE ja MD tulisivat todennäköisesti pienemmäksi, jos yleisten mallien ennusteet yleistettäisiin kuviotasolle. Näin ollen yleiset mallit voisivat tuottaa jopa tarkempia ennusteita kuin perinteisellä kuvioittaisella arvioinnilla voidaan saavuttaa. Metsien rakenteesta ja keilainyksilöiden välisistä eroista johtuvia virheitä voidaan kuitenkin korjata helposti muutaman päivän koealamittauksilla paikallisen kalibroinnin avulla. Tulosten mukaan yleisen mallin kalibrointi onnistuneella koealakombinaatiolla voi tuottaa jopa tarkempia ennusteita kuin aluekohtainen malli.

■ Eetu Kotivuori, Lauri Korhonen & Petteri Packalen,
Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto, Joensuu
Sähköposti: eetu.kotivuori@uef.fi

Jouni Siipilehto, Harri Lindeman, Mikko Vastaranta, Xiaowei Yu ja Jori Uusitalo

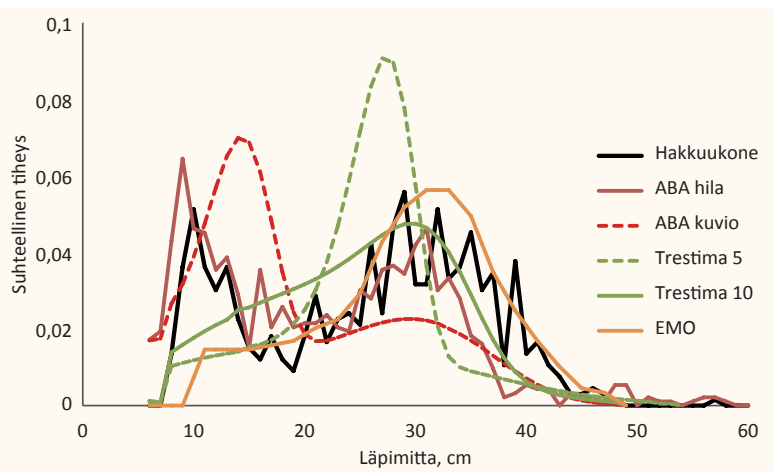
Päätihakkuukuvioille arvioidun puuston rakenteen luotettavuus laserkeilaus-tulkinnalla, *Trestima*-mobiil-sovelluksella ja *EMO*-ennakkomittausohjelmistolla

Seloste artikkelista: Siipilehto, J., Lindeman, H., Vastaranta, M., Yu, X. & Uusitalo, J. (2016). Reliability of the predicted stand structure for clear-cut stands using optional methods: airborne laser scanning-based methods, smartphone-based forest inventory app *Trestima* and pre-harvest measurement tool *EMO*. *Silva Fennica* 50(3), article id 1568.

<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1568>

Hakkuukohteiden puutavaralajien tarkka tunteminen auttaa optimoimaan leimikoiden korjuuohjelman ja allokoimaan puut eri puutavaralajeihin ja lopputuotteisiin. Puutavaralajien tilavuudet voidaan johtaa läpimitta-pituusjakaumasta, joka puolestaan ennustetaan yleisimmin metsikkökuvion puustotunnusten perusteella. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla ennakkoinventointivaihtoehtojen tarkkuutta päätihakkuupuustolle. Tutkitut menetelmät olivat aluepohjainen laserkeilaustulkinta (*Area Based Approach*, *ABA*), *Trestima* Oy:n mobiilisovellus ja hakkuukohteen ennakkomittausohjelmisto, *EMO*. Ennustettuja läpimitta-pituusjakaumia ja niistä laskettuja puusto- ja tilavuustunnuksia verrattiin hakkuukoneen rekisteröimistä runkokäyräaineistoista laskettuihin vastaaviin tunnuksiin.

Aineistona tutkimuksessa oli 7 päätihakkuukuviota Hämeenlinnan ympäristössä. Kuviot olivat pääasiassa järeitä, keskiläpimitaltaan yli 30 cm mäntyvaltaisia leimikoita, joissa oli myös kuusi- ja koivusekapuustoa. Kuvion keskitilavuus oli 340 m³/ha, josta tukkia oli 270 ja kuitupuuta 70 m³/ha.



Kuva 1. Esimerkki kuvion 5 suhteellisista runkolukusarjoista. Hilaperusteinen laserkeilaustulkinta *ABA hila*, kymmenen kuvan tulkinta *Trestima 10* ja ennakkomittausohjelmisto *EMO* läpäisivät yhteensopivuustestin ja *EMO* tuotti parhaan testiaron. Viiden kuvan tulkinta *Trestima 5* tuotti liian huipukkaan jakauman verrattuna hakkuukoneen runkolukusarjaan. *ABA kuvio* -menetelmällä pieniläpimittaisen puuston jakauman huippu ei sopinut yhteen hakkuukoneen runkolukusarjan kanssa.

ABA perustui lentokoneesta kerättyyn laserkeilausaineistoon, jonka pulssitiheys oli 0,6 pulssia/m² ja 364 puittain mitattuun metsikkökoelaan. Puustotunnukset ennustettiin kohteille lähimmän naapurin menetelmällä, jossa lähin naapuri määritettiin ”*random forest*”-luokittelulla. Tässä tutkimuksessa yksi lähinaapurikoeala 364 mitatusta maastokoelasta vastasi kutakin 16 m × 16 m hilaa. *ABA*-menetelmällä tuotettiin ennusteet männyn, kuusen ja lehtipuuston pohjapinta-alasta, runkoluvusta, pohjapinta-alalla painotetusta keskiläpimitasta ja pituudesta kullekin hilalle (*ABA hila* -menetelmä). Lisäksi tarkasteltiin vaihtoehtoa, jossa hilatason puustotunnukset yhdistettiin perinteisiksi kuviotunnuksiksi (*ABA kuvio* -menetelmä). *Trestima*-sovelluksella otettiin kustakin hakkuukohteesta 10 kuvaa (*Trestima 10*). *Trestiman* tuloksia tarkasteltiin lisäksi viiden kuvan otoksella (*Trestima 5*). Kuvilta tulkittiin relaskoopin toimintaperiaatteella puuston pohjapinta-ala, runkoluku ja keskiläpimitta. *EMO*-menetelmässä mitattiin viisi relaskoopikoealaa kultakin metsikkökuvilta. Kokonaispohjapinta-alan lisäksi mitattiin kuusi lähintä puuta (30 puuta/metsikkö). Lähipuiden mittausten perusteella kokonaispuustoa kuvaava pohjapinta-ala jaettiin puulajiryhmiin.

Runkolukusarjat ennustettiin kuviolle puustotunnuksista parametrien palautuksella sekä *ABA*- että *Trestima*-menetelmissä. *EMO*-menetelmässä runkolukusarjat tuotettiin puulajiryhmittäin (mänty, kuusi ja lehtipuut) kernel-tasoituksella, joka mahdollisti epäsäännöllisen jakauman muodon. Ennustetuista

jakaumista laskettiin puutavaralajien tilavuudet puulajeittain. Ennustettujen puusto- ja tilavuustunnusten luotettavuutta arvioitiin harhan ja keskineliövirheen neliöjuuren avulla. Lisäksi kuvion kokonaispuuston runkolukusarjoille tehtiin kaksi jakaumien yhteensopivuustestiä. Menetelmien paremmuutta arvioitiin kaikkiaan 70 eri luotettavuustunnuksen yhdistelmänä.

ABA hila ja *Trestima 10* olivat yleisesti tarkimpia menetelmiä läpimitta-pituusjakaumien ennustamiseksi. Aluepohjaisessa laserkeilausmenetelmässä jakaumat tuli ennustaa kullekin hilalle ja yhdistää sitten kuviotasolle, jotta voitiin tuottaa myös kaksi- tai useampihuippuisia runkolukusarjoja puulajeittain. Kun hilatason puustotunnukset yhdistettiin kuviotasolle (*ABA kuvio*), lopputulos ei ollut yhtä tarkka (ks. kuva 1). *Trestima*-sovellusta käytettäessä tulkittujen kuvien määrä vaikutti oleellisesti tuloksiin. *Trestima 5*-menetelmän viiden kuvan otos osoittautui riittämättömäksi luotettavien tulosten aikaansaamiseksi. *EMO*-menetelmä tuotti tarkimpia tunnuksia männylle, mutta se oli huomattavan epätarkka kuusi- ja lehtisekapuuston ennustamiseksi. *ABA hila* -menetelmä oli luotettava sekä puustotunnusten että runkolukusarjojen osalta. Jos ajantasaista laserkeilausinformaatiota on tarjolla, tuloksia voidaan tarkentaa vaihtoehtoisilla menetelmillä hyvin rajoitetusti.

■ Jouni Siipilehto, Luke, Vantaa
Sähköposti jouni.siipilehto@luke.fi

Ilpo Ervasti

Paperiteollisuuden materiaalivirtojen raaka-aineiden puukuitusisältö raakapuuekvivalentteina (RWE)

Seloste artikkelista: Ervasti, I. (2016). Wood fiber contents of different materials in the paper industry material chain expressed in roundwood equivalents (RWEs). *Silva Fennica* vol. 50 no. 4 article id 1611. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1611>

Tutkimuksen tarkoituksena oli löytää menetelmä, jonka avulla voitaisiin luotettavasti arvioida paperiteollisuuden eri materiaalivirtojen kuitusisältö. Kohteena olivat seuraavat materiaalit: massapuu, puumassa, keräyspaperi, kierrätysmassa ja lopputuotteena paperi. Tässä työssä käytetty termi paperi sisältää kaikki paperi- ja kartonkilajit. Yhtenäiseksi nimittäjäksi valittiin puuraaka-aine-ekvivalentti (*Roundwood Equivalent*, RWE), joka vastaa yhtä kuoretonta kiintokuutiometriä puuta.

Toistaiseksi on ollut vaikeaa verrata paperiteollisuuden materiaalivirroissa liikkuvien eri raaka-aineiden kuitusisältöä luotettavasti maa- ja aluetasolla. Määrien arvioinnin ja vertailun vaikeus on johtunut osittain siitä, että systeemin eri vaiheissa kulkevien eri materiaalien mittayksiköt, vesipitoisuus, sekä kuidun ja muiden kuin kuituraaka-aineiden osuudet vaihtelevat suuresti. On myös suuri määrä eri puu-, puumassa- ja keräyspaperilajeja sekä muita raaka-aineita, joiden määrät ja osuudet vaihtelevat eri massa- ja paperilajeja tuottaessa.

Tässä tutkimuksessa käytettiin materiaalivirtojen kuvaukseen yksityiskohtaista materiaalien virtausmallia (*Detailed Wheel of Fiber*). Tämä virtausmalli on kehitetty analysoimalla ja yhdistelemällä useita paperiteollisuuden materiaalien virtausmalleja, jotka kuvaavat materiaalivirtoja aluetasolla. Tällainen alue voi olla joko yksittäinen maa tai laajempi alue, kuten Eurooppa.

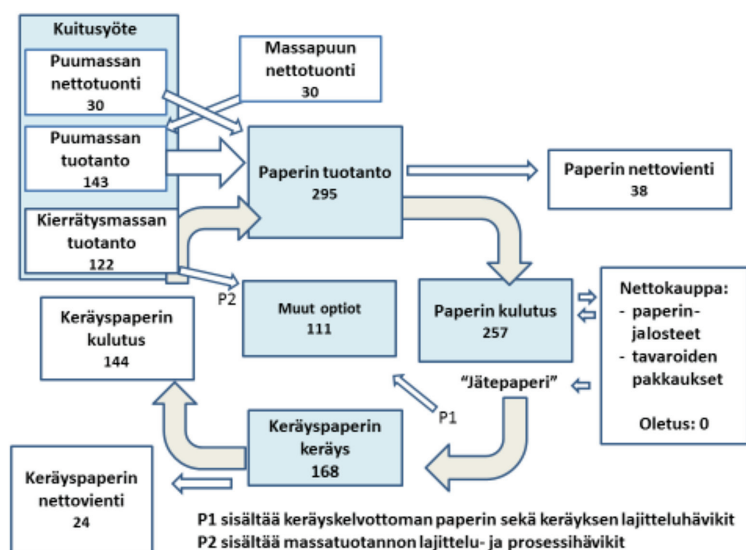
Perusvuotena käytettiin vuotta 2010, koska kyseiseltä vuodelta oli käytettävissä kattavat puumassa- ja keräyspaperilajikohtaiset materiaalikulutustaulukot paperilajikohtaisesti.

Tutkimusprosessi eteni portaittain. Aluksi käytettiin paperiteollisuuden materiaalien virtausmallia kuvaamaan paperiteollisuuden eri materiaalien virtoja. Samalla nämä materiaalivirrat arvioitiin määrällisesti. Toiseksi, massa- ja paperituotannon raaka-aineiden kulutus arvioitiin massa- ja paperilajikohtaisesti. Tässä käytettiin eri maiden massa- ja paperilajikohtaisia raaka-ainekulutustaulukoita. Kolmanneksi, eri puumassalajien tuotannossa käytettävät puuraaka-ainemäärät ja puuraaka-ainelajit arvioitiin tuotettua massatonna kohti. Neljänneksi, kuituvirtamallissa esiintyvät materiaalit jaettiin kolmeen eri komponenttiin, kuituun (kuiva), veteen ja muihin raaka-aineisiin. Viidenneksi, virtausmallin kuituvirta jaettiin kahteen eri osaan, neitseelliseen kuitukiertoon ja kierrätyskuitukiertoon. Kuudenneksi, materiaalien virtausmallin kuitumäärät muutettiin puuraaka-aine-ekvivalenteiksi käyttämällä laskettuja muuntokertoimia.

Tutkimuksessa esitellään uusi menetelmä, jolla voidaan arvioida materiaalien virtausmallin kuitumäärät. Työssä laskettiin muuntokertoimet, joita käyttämällä puumassa, keräyspaperi ja paperitonit voidaan muuntaa puuraaka-aine-ekvivalenteiksi. Näiden muuntokertoimien arvot ovat seuraavat:

- tonni puumassaa vastaa 4,0 puuraaka-aine-ekvivalenttia (m³)
- tonni keräyspaperia vastaa 3,0 puuraaka-aine-ekvivalenttia (m³)
- tonni paperia vastaa 3,1 puuraaka-aine-ekvivalenttia (m³)

Edellä mainittuja muuntokertoimia käyttämällä voidaan laskea esimerkiksi, että Euroopan alueella tuotettu 94 miljoonan tonnin paperimäärä vastaa 295 miljoonaa puuraaka-aine-ekvivalenttia. Vaikka Euroopassa kierrätysaste oli korkea, 69 % vuonna 2010, alueelta häviää vuosittain 173 miljoonan puuraaka-aine-ekvivalentin edestä kuitua mm. vietyinä paperina, vietyinä keräyspaperina sekä erilaisina kuitukierron hävikkeinä (muut optiot). Todellisuudessa vain 122 miljoonaa puuraaka-aine-ekvivalenttia vastaava määrä kuitua palaa kiertoon. Tämä puuttuva



Kuva 1. Euroopan paperiteollisuuden materiaalien virtausmalli 2010. Eri materiaalivirrat on muunnettu miljooniksi puuraaka-aine-ekvivalenteiksi.

173 miljoonaa puuraaka-aine-ekvivalenttia vastaava kuitumäärä pitää korvata alueen omalla puumassan tuotannolla sekä puumassan ja raaka-puun tuonnilla alueen ulkopuolelta. Kuvassa 1 esitetään Euroopan paperiteollisuuden materiaalien virtausmalli, josta ilmenee paperiteollisuuden materiaalivirrat miljoonina puuraaka-aine-ekvivalenteina.

Esiteltyjä muuntokertoimia voidaan käyttää myös laskettaessa paperin kierrätyksen vaikutusta paperiteollisuuden globaaleihin kuituvirtoihin. Keräyspaperin käyttö paperituotannossa oli maailmanlaajuisesti noin 222 miljoonaa tonnia vuonna 2010. Tämä vastaa noin 666 miljoonaa puuraaka-

aine-ekvivalenttia. Mikäli paperia ei kierrätettäisi lainkaan koko maailmassa, tarvittaisiin vastaava kuitumäärä neitseellisten massojen muodossa yhtä suuren paperimäärän tuottamiseen. Määrältään tämä vastaa 1,6 kertaisesti Euroopan metsien vuosittaista poistumaa tai lähelle Kanadan, USA:n ja Brasilian metsien vuotuista poistumaa, joka oli 701 miljoonaa puuraaka-aine-ekvivalenttia vuonna 2010.

■ Ilpo Ervasti, Aalto University, Department of Industrial Engineering and Management, Helsinki
Sähköposti ilpo.ervasti@aalto.fi

Matti Haapanen ja Seppo Ruotsalainen

Täsmätietoa männyn alkuperäsiirtojen vaikutuksista

Seloste artikkelista: Berlin, M., Persson, T., Jansson, G., Haapanen, M., Ruotsalainen, S., Barring, L., Andersson Gull, B. (2016). Scots pine transfer effect models for growth and survival in Sweden and Finland. *Silva Fennica* vol. 50 no. 3. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1562>

Viljelymetsätaloudessa käytettävissä olevien siemenlähteiden määrä on käytännön syistä rajallinen, joten metsänviljelyssä joudutaan lähes aina käyttämään muuta kuin tarkasti paikallista alkuperää. Metsäpuiden alkuperäsiirtojen vaikutuksia on selvitetty kenttäkokein, joista vanhimmat perustettiin Suomessa jo 1930-luvulla. Niiden tulosten pohjalta tiedetään, että puilla on melko laaja ”kotiseutu”, jonka sisällä tietyin metsikön siementä voidaan viljellä verrattain turvallisesti. Alkuperäsiirroista tämän alueen ulkopuolelle aiheutuu yleensä ongelmia taimikoiden kasvuun ja elävyydelle. Metsänviljelyaineiston kaupan vapautumisen ja kansainvälistymisen myötä markkinoille voi nykyisin tulla ilmastoomme huonosti sopivia alkuperiä. Toisaalta ilmastomuutos voi vaikuttaa myös kotoisten siemenalkuperiemme menestymisedellytyksiin. Entistä tarkemmalle tiedolle siemensiirtojen vaikutuksista on siis tarvetta.

Aiempien tutkimusten perusteella tiedetään, että metsäpuilla siemensiirtoon liittyvän riskin suuruus riippuu siemenen alkuperän sijaintipaikkakunnan ja viljelypaikan lämpösommien erosta. Ilmaston lämmetessä kasvukauden lämpösomma ei kuitenkaan ole enää yhtä käyttökelpoinen viljelyvarmuuden mittari kuin aiemmin.

Tutkimuksen kohdepuulajiksi valikoitui mänty, josta oli saatavilla puulajeistamme laajin empiirinen aineisto mallinnuksen pohjaksi. Tutkimus toteutettiin ruotsalais-suomalaisena yhteistyönä aineistolla, johon kuului yhteensä 378 männyn kenttäkoetta Suomesta ja Ruotsista. Viljelykokeiden aineistoina käytettiin yhteensä 276 erilaista männyn valikoimatonta metsikköalkuperää, joista oli saatavilla

pituus- ja elävyystieto 8–35 (keskimäärin noin 17) vuoden iällä tehdyistä mittauksista. Ruotsista tutkimusaineistoon kelpuutettiin vain 60. leveysasteen pohjoispuolella sijaitsevat kenttäkokeet.

Kenttäkokeisiin viljeltyjen mäntyalkuperien, joita oli siirretty eri suunnista ja eripituisia matkoja, pituuskasvua (logaritmiasteikolle muunnettua) ja elävyyttä (logit-asteikolle muunnettua) selitettiin useilla ilmastomuuttujilla ja niiden yhdistelmillä. Mallinnuksessa käytetyt ilmastotiedot perustuivat Ruotsin ja Suomen kattavaan hilaverkkoon, joka Ruotsissa koostui 4 × 4 kilometrin (PTHBV) ja Suomessa 10 × 10 kilometrin (FINADAPT) kokoisista ruuduista.

Tutkimuksessa laaditut pituus- ja elävyyshallit ovat lineaarisia sekamalleja, joissa molemmissa on kolme paikallisen alkuperän menestymistä ja neljä siirron vaikutusta selittävää kiinteää pää- tai yhdysvaikutustekijää sekä yksi satunnainen tekijä (koe-paikka). Paikallisen alkuperän kasvua ja elävyyttä selitti parhaiten lämpösomma, kun taas siemensiirron vaikutusten selittäjistä määrääväksi osoittautui alkuperän ja viljelypaikan leveysasteen erotus.

Pituuskasvulle saatu malli osoittaa, että alkuperäsiirrot etelän suunnasta tuottavat muutaman prosentin kasvunlisäyksen paikalliseen alkuperään verrattuna. Tällä on käytännön merkitystä vain Etelä-Suomen ilmastossa. Pituuskasvun parannus on suurin 0,5–2 leveysasteen siirrolla etelästä. Vastaavasti viljelyaineiston siirto pohjoisesta heikentää kasvua, kahden leveysasteen pituisen siirron vaikutuksen ollessa enimmillään noin –10 %.

Elävyydessä muutos on pituuskasvuun nähden päinvastainen: siirtämällä aineistoa viljelypaikalle 2–3 leveysasteen päästä pohjoisesta elävyys paranee 5–10 %-yksikköä. Viljelyaineiston siirrot etelästä puolestaan vaikuttavat elävyyteen huomattavan kielteisesti; kahden leveysasteen pituisen siirto etelästä merkitsee elävyyden alenemista 10–20 %-yksiköllä.

Mallinnuksen yhteydessä todettiin, että Suomen mäntyaineistoissa elävyys oli vastaavissa olosuhteissa noin 15 %-yksikköä alempi kuin Ruotsin aineistossa. Tämä selittyy todennäköisesti eroilla kenttäkoepaikkojen valinnassa ja kokeiden perustamistekniikassa. Yhtä selkeää selittävää tekijää erolle ei kyetty osoittamaan, ja se huomioitiin elävyyshallissa yksinkertaisen maakohtaisen korjaustekijän avulla. Pituuskasvussa vastaavaa poikkeamaa

maiden välillä ei todettu.

Mallien soveltuvuutta testattiin riippumattomalla aineistolla, johon sisältyi 3921 männyn pluspuiden jälkeläistöä 119 jälkeläiskokeesta. Metsikkösiemenaineistolla laadittujen mallien ennusteiden vertailu jälkeläiskokeista mitattuihin tuloksiin osoitti mallien pätevän hyvin myös jalostetulle siemenaineistolle.

Uudet siirtomallit todentavat jo sen aiemmin tunnetun asian, että metsänviljelyaineiston siirtäminen leveysasteen suhteen vaikuttaa eri tavoin elävyyteen ja kasvuun. Siirtosuosituksia laadittaessa on siten välttämätöntä tarkastella näiden kahden puuntuotoksen kannalta keskeisen ominaisuuden yhteisvaikutusta. Uusien mallien avulla siemensierrojen tuotosvaikutuksia on mahdollista arvioida entistä täsmällisemmin. Kysymys suositeltavista siemensierroista on kuitenkin laajempi ja monitahoisempi eikä siihen otettu kantaa tässä tutkimuksessa, jonka tavoitteena oli ainoastaan mallintaa siemensierrojen vaikutuksia. Sen sijaan uusia malleja on jo hyödynnetty kahdessa Luonnonvarakeskuksen jatkotutkimuksessa, joissa päivitettiin männyn kotimaisten siemenviljelysten käyttöalueet (Ruotsalainen ym. 2016) sekä siirtosuositukset männyn metsikkösiemenelle (Beuker ym., julkaisu vuonna 2017).

Lähteet

Beuker, E., Ruotsalainen, S. & Haapanen, M. 2017. Metsikkösiemenen siirtosääntöjen laatiminen. Luonnonvarakeskuksen tutkimusprojekti.

Ruotsalainen, S., Beuker, E. & Haapanen, M. 2016. Männyn siemenviljelysaineiston käyttöalueen määrittäminen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 39/2016. 36 s.

■ Matti Haapanen & Seppo Ruotsalainen,
Luonnonvarakeskus, Punkaharju
Sähköposti matti.haapanen@luke.fi

Teija Ruuhola, Ari Nikula, Vesa Nivala,
Seppo Nevalainen ja Juho Matala

Kallioperä ja maalaji vaikuttavat hirvivahinkojen määrään

Tutkimuslaseste artikkelista: Ruuhola, T., Nikula, A., Nivala, V., Nevalainen, S. & Matala, J. (2016). Effects of bedrock and surficial deposit composition on moose damage in young forest stands in Finnish Lapland. *Silva Fennica* vol. 50 no. 3 article id 1565.

<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1565>

Hirvien aiheuttamat tuhot erityisesti mäntyvaltaisille taimikoille ovat lisääntyneet huomattavasti 2000-luvulla. Taimikoiden hirvivaurioista suurin osa tapahtuu talvikaudella, mikä johtuu osittain hirvien uskollisuudesta talvilaidunalueille, jolloin hirvituhot keskittyvät näille alueille vuodesta toiseen. Hirvet valitsevat elinympäristönsä ja ravintonsa useilla eri kriteereillä, joista osa liittyy aikaisempien tutkimusten mukaan kasvupaikan ominaisuuksiin. Hirvien on todettu suosivan runsasravinteisia kasvupaikkoja, joissa on määrällisesti paljon hyvälaatuista ravintoa saatavilla. Tärkeimmät kasvien käyttämät ravinteet typeä lukuun ottamatta ovat peräisin pintamaan alla olevasta kallioperästä, mutta kasvupaikan ominaisuuksiin vaikuttavat myös maa-aineksen paksuus ja raekoko. Vaikka kasvupaikan ominaisuuksien ja hirvituhojen välillä on todettu yhteys, yksityiskohdaisemmat tutkimukset erilaisten maaluokkien ja kallioperän vaikutuksesta hirvituhojen esiintymiseen ja määrään ovat toistaiseksi puuttuneet.

Tutkimuksessa selvitettiin hirvivahinkojen yhteyksiä vahinkoalueiden kallio- ja maaperään ja topografiaan. Tutkimusalue käsitti kolmea pohjoisinta kuntaa lukuun ottamatta koko Lapin. Tutkimuksen hirvituhoaineistona käytettiin yksityisille maanomistajille vuosina 1997–2010 korvattujen hirvivahinkojen paikannettuja tietoja, joita oli kaikkiaan 5362. Vertailuaineistona käytettiin samalta alueelta vuosina 1989–2008 mitattuja Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) maastokoealoja, joilla ei ollut havaittu tuhoja. Koealametsiköiden tuli kuulua

VMI:n mukaisiin kehitysluokkiin 2–4, eli nuoriin ja varttuneisiin taimikoihin tai nuoriin kasvatusmetseen. Niiden tuli lisäksi sijaita yksityisten omistamilla mailla. Yhteensä verrokkikoealoja oli 4551.

Tuhotaimikoille ja verrokkikoealoille määritettiin niiden kallioperä- ja maaperäluokka Geologian tutkimuskeskuksen Hakku-tietokannasta ladattujen kallioperätietokannan ja maalajitietokannan avulla. Kivilajeista muodostettiin analyysijä varten kuusi luokkaa geologisen alkuperän ja ominaisuuksien perusteella: 1) Kalkkikivet, 2) Emäksiset kivet, 3) Liuskeet ja fylliitit, 4) Happamat kivilajit, 5) Gneissit ja 6) Kvartsiitit. Näistä kolme ensimmäistä luokkaa ovat runsasravinteisia kivilajeja, kun taas kolme viimeistä luokkaa ovat vähäravinteisia kivilajeja, tai niiden ravinteet eivät ole helposti kasvien käytössä rapautuneessa kiviaineksessa. Maalajit jaettiin analyysijä varten viiteen luokkaan: 1) Hienojakoiset lajittuneet maaperät, 2) Karkearakeiset lajittuneet maalajit, 3) Kalliokot ja kiviset maalajit, 4) Lajittumattomat maaperät (moreeni) ja 5) Turvepiteiset maat. Tuhotaimikoiden ja verrokkikoealojen korkeusmerenninnasta saatiin Maanmittauslaitoksen korkeusaineistosta ja niiden sijoittuminen muinaismerien ja jäärjärvien alueille määritettiin Hakku-tietokannan muinaisrantojen kartta-aineiston perusteella. Kasvupaikkaluokka määritettiin suoraan tuhotaimikoiden tiedoista sekä VMI-kuviotiedoista.

Hirvituhotaimikot olivat suurelta osin keskittyneet Lounais-Lapin Perä-Pohjan liuskealueelle, sekä Sallan alueelle Itä-Lappiin Lapin vihreäkivivyöhykkeelle. Vahinkometsiköitä sijaitsi tilastollisesti merkittävästi enemmän ravinteikkaiden kallioperien alueilla kuin vahingoittumattomia verrokkikoealoja. Hirvituhotaimikoiden kasvupaikkaluokka oli useammin tuore- tai kuivahko kangas kuin vertailukoealoilla. Tuhotaimikoiden kallioperissä oli suhteellisesti enemmän ravinteikkaita kalkkikiviä ja emäksisiä kivilajeja kuin vertailukoealoilla, joiden kallioperässä oli puolestaan enemmän vähäravinteisia happamia (graniittia ja gneissia) ja intermediaarisia kivilajeja. Tuhoja oli enemmän erityisesti ravinteikkaille, hienojakoisille maaperille perustetuissa mäntytaimikoissa kuin muissa maaperä-kallioperä-yhdistelmissä. Ravinteikkaimpien kallioperien osuus laski kasvupaikan ravinteikkouden laskiessa sekä tuhotaimikoiden aineistossa että verrokkikoeala-aineistossa. Tuhotaimikoissa

oli kuitenkin merkittävästi enemmän ravinteikkaita kallioperiä kaikissa kasvupaikkaluokissa kuin verrokkikoealoilla. Tuhotaimikoiden maaperä oli merkittävästi useammin lajittumaton moreeni kuin vertailukoealoilla. Tuhotaimikot sijaitsivat myös suhteellisesti enemmän muinaismerien ja jäärjärvien alueella kuin taimikot, joissa ei ollut havaittu tuhoa. Lounais-Lapissa tuhotaimikot sijaitsivat keskimäärin muuta maastoa korkeammilla kohdilla kuin vertailukoealat, kun taas pohjoiseen ja Itä-Lappiin päin mentäessä tilanne muuttui päinvastaiseksi.

Tuhojen keskittyminen Lapin vihreäkivialueelle ja Peräpohjan liuskekivialueelle viittaisi siihen, että näillä alueilla kalliio- ja maaperässä olevat ravinteet vaikuttavat myös taimikoiden maistuvuuteen hirville. Muinaismerien ja jäärjärvien alueilla tuhoja saattaa selittää myös se, että joillakin alavilla maastonkohdilla hienojakoinen maaperä on huuhtoutunut korkeampien alueiden rinteiltä ja peittää alla olevan maakerroksen. Tällöin kuivan pintakerroksen alla on kostea maakerros, joka koostuu hiesusta, savesta tai hienojakoisesta moreenista, joten pinnalla oleva maaperä ei pelkästään määrää kasvupaikan ravinteikkoutta.

Entisiä kuusimaita on uudistettu aikanaan mänyllä paremman tuotoksen vuoksi, mikä on kuitenkin aiheuttanut monia ongelmia metsänkasvatuksessa. Tulosten perusteella mäntytaimikoiden perustaminen entisille kuusimaaperille näyttää lisäävän alttiutta hirvituhoille. Kalliio- ja maaperän yhteisvaikutus saattaa selittää aikaisemmin saadut osin ristiriitaiset tulokset maaperän ja kasvupaikan vaikutuksesta hirvituhojen esiintymiseen. Tutkimuksen perusteella taimikoiden tuhoalittiutta voidaan arvioida yleisesti saatavilla olevien kallioperä- ja maaperäaineistojen avulla. Koska kalliio- ja maaperä ovat ihmisen näkökulmasta jokseenkin muuttumattomia, olisi aineistojen avulla periaatteessa mahdollista muodostaa metsätalouden käyttöön luokitus, jossa hirvituho-riskiä on arvioitu maaperä- ja kallioperätekijöiden avulla.

■ Teija Ruuhola, Luonnonvarakeskus & Itä-Suomen Yliopisto, Joensuu; Ari Nikula & Vesa Nivala, Luonnonvarakeskus, Rovaniemi; Seppo Nevalainen ja Juho Matala, Luonnonvarakeskus, Joensuu
Sähköposti: ari.nikula@luke.fi

Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa ja
Tuula Kantola

Metsähyönteisten aiheuttaman lehvästökadon kaukokartoitusseurannan kehittäminen Fennoskandian olosuhteisiin

Seloste artikkelista: Olsson, P.-O., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Jönsson, A.M. & Eklundh, L. 2016. Development of a method for monitoring of insect induced forest defoliation – limitation of MODIS data in Fennoscandian forest landscapes. *Silva Fennica* 50(2), article id 1495. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1495>

Tuhohyönteisten joukkoesiintymät vaikuttavat metsäekosysteemin rakenteeseen, toimintaan, puulajikoostumukseen ja metsän sukkessiokehitykseen. Lehvästövauriot aiheuttavat puuston kasvun heikkenemistä ja kuolleisuuden etenemistä, mikä voi johtaa huomattaviin taloudellisiin menetyksiin. Hyönteisten joukkoesiintymät tulevat yleistymään ja levinneisyysalueet nousemaan kohti pohjoista ilmastonmuutoksen vaikutuksen ajamina. Tästä syystä hyönteisten aiheuttamien metsätuhojen kustannustehokkaan kartoituksen ja seurannan kehittäminen on erityisen tärkeää.

Kaukokartoitus tarjoaa laajan valikoiman tehokkaita menetelmiä metsäisten häiriöiden havainnointiin, kuten on todettu Lyytikäinen-Saarenmaan ym. vuonna 2015 tekemässä kirjoituksessa. Usein melko hintavien ilmakuvien ja korkean spatiaalisen resoluution (1–5 m) tarjoavien satelliittiaineistojen lisäksi monia metsähyönteisten joukkoesiintymiin sovellettuja ratkaisuja on Kantolan ym. artikkelin mukaan kehitetty pohjautuen keskiresoluution (10–30 m) aineistoihin. Landsat (TM) (*Thematic mapper*) kuvia on käytetty Kanadassa mm. vuoristonilurin (*Dendroctonus ponderosae*) ja Suomessa pilkkumäntypistiäisen (*Diprion pini*) aiheuttamien vaurioiden kartoitukseen. Keskiresoluution sensoreilla on heikkoutenaan alhainen temporaalinen resoluutio eli pitkä aikajakso kuvausten välillä. Tämä

voi joskus aiheuttaa väärän ajoituksen kartoitettavan tuholaisen joukkoesiintymän ajankohdan suhteen. Fennoskandiassa ei ole epätavallista kohdata esim. Landsat-kuvausten eri ajankohtiin osuvaa pilvisyyttä, mikä rajoittaa puustovaurioiden seurantaan. Ratkaisuna temporaalisen resoluution kohottamiselle on karkean spatiaalisen resoluution (250–1000 m) satelliittiaineiston käyttö. Useita erityyppisiä karkean resoluution satelliittiaineistoja on käytetty hyönteisten joukkoesiintymien kartoituksiin. MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) lähes reaaliaikaisena on soveltunut esim. kaarnakuoriaisten, perhostuholaisten ja mäntypistiäisten seurantaan. MODIS-aineistoilla toteutetut tutkimukset ovat usein kohdistuneet laajoille, homogeenisille metsäalueille. Tästä syystä tässä tutkimuksessa kehitettiin MODIS-aineistoihin perustuva menetelmä Fennoskandiassa, jossa metsät ovat usein pistoutuneita talousmetsiä. Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida korkeaan temporaaliseen resoluutioon perustuvan aikasarjamenetelmän käyttökelpoisuutta hyönteistuhojen seurannassa Fennoskandian pirstoituneissa metsissä sekä verrata menetelmän tarkkuutta erityyppisissä metsäekosysteemeissä ja lehvästövaurioita aiheuttavien eri hyönteislajien välillä.

Tutkimus toteutettiin Suomessa kahdella tutkimusalueella, Ilomantsin Palokankaalla ja Outokummun kaupungin ympäristössä. Molemmat alueet ovat topografialtaan melko tasaisia, kuivahkoja kangasmetsiä, joissa metsämänty on pääpuulaji. Nämä talousmetsät ovat pirstoituneita pieniin metsikkökuvioihin. Ilomantsissa ensimmäiset pilkkumäntypistiäisen neulassyönnin oireet näkyivät jo vuonna 1999, ja joukkoesiintymä on Kantolan ym. mukaan jatkunut yli 15 vuotta noin 15 000 ha:n alueella. Outokummussa ruskomäntypistiäisen (*Neodiprion sertifer*) joukkoesiintymä tapahtui vuosina 2008–2011, kattaen noin 50 000 ha (kuva 1). Kolmas tutkimusalue sijaitsi Abiskossa Pohjois-Ruotsissa, jossa talouskäytön ulkopuolella olevien alueiden pääpuulaji on hieskoivun alalaji tunturikoivu. Maisemassa vuorottelevat tunturikoivikot, suot, varvikot ja heinikot. Kohdealueella tapahtui laaja tunturimittarin (*Epirrita autumnata*) ja hallamittarin (*Operophtera brumata*) joukkoesiintymä viimeksi vuosina 2004 ja 2012–2013.

Ilomantsin Palokankaalla pysyviä ympyräkoaloja (n = 180) pilkkumäntypistiäisen seurantaan on



Kuva 1. Ruskomäntypistiäisen aiheuttamaa voimakasta neulaskatoa varttuneessa taimikossa Outokummussa. (kuva: Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa)

perustettu vuosina 2002, 2007 ja 2009. Outokummussa vastaavat koealat ruskomäntypistiäisen seurantaan perustettiin vuonna 2009 ($n=40$). Koealojen keskipisteet paikannettiin tarkalla GPS-laitteella ja puiden pituus, rinnankorkeusläpimitta ja sijanti mitattiin. Koealojen jokaisen männyn neulaskatoaste on arvioitu silmävaraisesti 10 % tarkkuudella vuosittain. Lisäksi neulaskatoaste arvioitiin laajemmalta alueelta kuvioittain Iiomantsissa ($n=87$) ja Outokummussa ($n=43$). Arviointien perusteella aineisto luokiteltiin kahteen osaan: neulaskato $<20\%$ (terveet) ja neulaskato $>20\%$ (syödyt). Abiskossa maastoaineisto kerättiin kesällä 2013, jossa koealue jaettiin MODIS-pikseleitä (spatiaalinen resoluutio 250 m) vastaaviin ruutuihin. Koeruudut ($n=80$) paikannettiin GPS-laitteella ja mittariperhostoukkien aiheuttama lehtikato arvioitiin ruuduittain. Alle 50 % ruutukohtainen lehtikato luokiteltiin terveeksi ja $>50\%$ lehtikato syödyksi. Kaksi Terra/MODIS-satelliittisensorin aineistoa otettiin tähän tutkimukseen: 1) MOD09Q1, jossa pinnan heijastus on punaisella ja infrapunaisella (NIR) aallonpituuskaistalla kahdeksan päivän jaksoina ja 250 m spatiaalisella resoluutiolla, ja 2) MOD09A1, jossa pinnan heijastus on kahdeksan päivän jaksoina ja 500 m spatiaalisella resoluutiolla.

Menetelmän kehityksessä oli neljä päävaihetta kullekin koealueelle: 1) heijastuspiirteet punaisella ja infrapunaisella (NIR) spektrin alueella irroitettiin MOD09Q1 aineistosta ja laskettiin kasvillisuusindeksit. Tähän sovellettiin NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) ja EVI2 (*2-band Enhanced Vegetation Index*) -kasvillisuusindeksejä; 2) aikasarjat luotiin näiden kasvillisuusindeksien pohjalta ja prosessoitiin TIMESAT-ohjelmalla (Jönsson ja Eklundh), jotta löydettäisiin muuttuja edustamaan metsänterveyttä ko. ajankohdalle; 3) kyseiselle muuttujalle arvioitiin keskiarvo ja keskihajonta metsätuhosta vapaalla jaksolla; ja 4) MODIS-pikselit luokiteltiin syötyihin tai terveisiin perustuen ko. muuttujan z -pistemäärään (z -score). Korkea z -pistemäärän varianssi voi aiheuttaa alemman z -pistemäärän arvon, mikä vaikuttaa Petersin ym. mukaan menetelmän tarkkuuteen. Tutkimuksessa oletettiin, että korkeat kasvillisuusindeksien arvot edustivat terveen metsän tilannetta kunkin pikselin osalta. Pikseleille laskettiin referenssiarvot edustamaan korkeiden havaintotarkkuuksien vuosia. ROC-käyriä (*Receiver Operating Characteristics*) käytettiin apuna määrittämään referenssiavuodet ja löytämään sopivat z -pistemäärän kynnyksarvot.

Menetelmän kehitysvaiheessa Iiomantsin tilan-

ne oli ongelmallinen, koska pilkkumäntypistiäisen joukkoesiintymän ajallinen kesto oli yhtä pitkä kuin MODIS-aineiston aikajakso. Lisäksi alueella toteutettiin lähes vuosittain pääte- tai harvennushakkuuta metsätuhon vuoksi, mikä vaikeutti kasvillisuusindekseihin perustuvaa tulkintaa. Tämän vuoksi Ilomantsista ei saatu referenssi vuosia, jolloin metsätuho ei vallitsisi tutkimusalueella. Tästä syystä vain Outokummun koealatietoja voitiin käyttää tutkimuksessa. Ainoastaan MODIS-pikseleillä sijaitsevat koealat otettiin käsittelyyn, koska MODIS-aineistojen spatiaalinen tarkkuus on matala (250 m). Menetelmä sovellettiin myös Abiskosta kerättyihin maastoaineistoihin, jossa kaikki mittausruudut voitiin ottaa mukaan. Toimivammaksi osoittautuneen EVI2-kasvillisuusindeksin aikasarjat luotiin vuosille 2001–2013.

Outokummun aineistot osoittivat, että neljältä tai viideltä vuodelta lasketuista referenssiolosuhteista saadut ROC-käyrät olivat samankaltaiset ($z=4-2.9$). Kuuden vuoden ROC-käyrä oli matalampi eli enemmän terveiden koealojen havaintoja oli väärinluokiteltu syödyiksi. Optimaalinen z-pistemäärän kynnyksiarvo oli -2.9 , mikä tuotti 50 % oikeinluokituksen syötyjen koealojen suhteen ja matalan terveiden koealojen väärinluokituksen (taulukko 1). Menetelmä ei tuottanut luotettavaa tulosta pitkäkestoisesta joukkoesiintymän vuoksi Ilomantsissa. Ainoastaan 27 % syödyistä koealoista havaittiin ja väärinluokitus oli 54 % (taulukko 1). Menetelmän sopivuutta erityisilanteisiin kokeiltiin myös soveltamalla korkeampaa z-kynnyksiarvoa ($z=-2.1$) molempien koealueiden aineistoihin. Tämä tuotti kuitenkin korkeamman terveiden koealojen väärinluokituksen (taulukko 1). Nämä tulokset osoittivat sen ajanjakson merkityksen, jolloin satelliittiaineistoa oli käytössä joukkoesiintymän ulkopuolisista vuosista.

Ruotsalaiseen Abiskon aineistoon sovelletut ROC-käyrät osoittivat, että referenssiolosuhteiden täytyisi perustua kuuteen vuoteen ja kynnyksiarvoksi asettaa $z=-6.0$. Menetelmä tuotti syötyjen koeruutujen 75 % oikeinluokituksen ja terveiden alueiden 19 % väärinluokituksen. Nämä Abiskon merkittävästi paremmat tulokset osoittivat, että MODIS-aineistot tuottavat korkeamman luokittelutarkkuuden kohteilla, jotka ovat laajoja homogeenisiä alueita intensiivisen metsätalouden ulkopuolella.

Tutkimus osoitti sekä mahdollisuuksia että ongel-

Taulukko 1. Menetelmän arvioinnin tulokset pikseleittäin Outokummun ja Ilomantsin koealueilla. z-pistearvot (z-score) ovat EVI2-indeksin kasvukauden maksimien kynnyksiarvoja, jotka on sovitettu TIMESAT-ohjelman logististen funktioiden avulla.

	Outokumpu		Ilomantsi	
Kynnyksiarvo (EVI2 z-score)	-2,9	-2,1	-2,9	-2,1
Havaittu neulaskato	50 %	63 %	27 %	46 %
Väärinluokitellut terveet	22 %	37 %	54 %	70 %

mia matalan spatiaalisen resoluution aineiston käytössä lehvästökatoa aiheuttavien metsähyönteisten joukkoesiintymien seurannassa Fennoskandiassa. Homogeenisilla tunturikoivikkoalueilla menetelmä toimi melko hyvin ja väärinluokitus oli matalaa. Intensiivisen metsätalouden tutkimusalueilla taas metsät olivat pienten, alati muuttuvien kuvioiden mosaiikki. Täällä oikeinluokituksen tarkkuus oli matalampaa ja vastaavasti väärinluokiteltujen terveiden kuvioiden pikseleiden määrä liian suuri. Suurin syy heikompaan tulokseen oli ilmeisesti MODIS-aineistojen matalassa spatiaalisessa resoluutiassa, joka tuotti sekä terveitä että syötyjä metsikkökuvioita sisältäviä sekoittuneita pikseleitä. Tulokset olivat myös heikompi kuin esimerkiksi Ilomantsissa tehdyissä Landsat TM -tulkinnoissa. Tulokset ovat myös vaatimattomampia verrattuna Pohjois-Amerikassa ja Venäjällä tehtyihin vastaaviin tutkimuksiin, joissa kohdealueet olivat laajoja, koskemattomia metsäalueita. Abiskosta saatiin kuitenkin rohkaisevia tuloksia. Menetelmä voi olla käyttökelpoinen myös lehtipuuvaltaisessa metsäekosysteemissä, jos vain pirstoutuneisuuden taso on matala.

Joukkoesiintymän historia oli myös merkittävä tekijä vaikuttamassa menetelmän tarkkuuteen. Ilomantsissa MODIS-aineisto kattoi kaikki krooniseksi muuttuneen joukkoesiintymän vuodet, kun taas Outokummussa oli riittävästi referenssi vuosia ennen joukkoesiintymää. Mäntypistiäisten neulassyönnin tulkinnan ongelmana oli myös se, että mänty toipuu hitaasti neulasiston vaurioista. Voimakas neulassyönti näkyy useita vuosia, kunnes normaali biomass on saavutettu. Koivu taas voi tuottaa normaalin lehväbiomassan jopa vuoden kuluttua tuhosta, mikä paransi Abiskon aikasarjan tuloksia. Molemmassa metsäekosysteemeissä lehvästökadon voimakkuus

oli oleellinen tekijä. Abiskossa toukkien lehtisyönti oli runsasta ja tapahtui nopeasti, kun taas varsinkin Ilomantsissa neulassyönnin taso vaihteli vuosien välillä ja oli keskimäärin matalampaa.

MODIS-aineistolla on etuna korkeampi ajallinen kattavuus, vähäisempi aineiston laskentatarve ja pitkäkestoiset aikasarjat. Näitä aineistoja voidaan hyödyntää metsäisten häiriöiden seurannassa alueilla, joilla pilvisuus heikentää keskiresoluution satelliittiaineistojen käyttöä tai lyhyt kasvukausi rajoittaa kuvien määrää. Pienpiirteisen ja pirstoutuneen metsämaiseman tilanteessa taas seurantaan sopivat keskiresoluution aineistot, jos niitä saadaan riittävä määrä tuhotilanteen keston ajalta. Tulevaisuuden hyönteistuhojen seurannassa voi olla mahdollista soveltaa kehitettyä menetelmää toisiin satelliittiaineistoihin, kuten esim. korkean spatiaalisen, spektraalisen ja temporaalisen resoluution omaavaan Sentinel-2 MSI (*Multi Spectral Instrument*) -aineistoon.

Kirjallisuutta

- Jönsson, P. & Eklundh, L. 2004. TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30: 833–845.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Yu, X., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Talvitie, M., Kaasalainen, S., Solberg, S. & Hyyppä, J. 2010. Classification of defoliated trees using tree-level airborne laser scanning data combined with aerial images. *Remote Sensing* 2: 2665–2679.
- Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Kantola, T., Blomqvist, M. & Kosunen, M. 2015. Hyönteistuhoriskien hallinta uusilla teknologioilla. *Metsätieteen Aikakauskirja* 1/2015: 36–41.
- Peters, A.J., Walter Shea, E.A., Lel, J., Vliia, A., Hayes, M. & Svoboda, M.D. 2002. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68(1): 71–75.

■ Metsäentomologian dosentti, MMT Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa & tutkija, MMM Tuula Kantola: Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos
Sähköposti: paivi.lyytikainen-saarenmaa@helsinki.fi

Maiju Peura ja Mikko Mönkkönen

Metsienkäsittely keruu- tuotesatojen ja puutulojen samanaikaiseen tuottamiseen metsämaisemassa

Tutkimuseloste artikkelista: Peura, M., Triviño, M., Mazziotta, A., Podkopaev, D., Juutinen, A., Mönkkönen, M. (2016). Managing boreal forests for the simultaneous production of collectable goods and timber revenues. *Silva Fennica* vol. 50 no. 5 article id 1672.
<http://dx.doi.org/10.14214/sf.1672>

Puuntuotanto on taloudellisesti merkittävimpiä ekosysteemipalveluja boreaalisissa metsissä, mutta se vaikuttaa usein negatiivisesti moniin muihin metsien tarjoamiin hyötyihin aiheuttaen ristiriitoja metsien eri käyttömuotojen välille. Myös keruutuotteet, kuten marjat ja sienet, ovat sekä taloudellisesti että virkistyksestä arvokkaita hyödykkeitä metsissä. Aiemmat tutkimukset ovat selvittäneet optimaalisia metsänkäsittelytapoja tuottaa samanaikaisesti puuta ja keruutuotteita yksittäisillä metsäkuvioilla. Kuitenkin laajemmalla metsän maisematasolla tietoa mahdollisista konflikteista ja optimaalisista metsienkäsittelystä puun ja keruutuotteiden samanaikaisella tuotannolle on niukasti. Me tutkimme, millaisia konflikteja metsämaisematasolla on puuntuotannon sekä mustikan (*Vaccinium myrtillus*), puolukan (*Vaccinium vitis-idaea*) ja herkkutattien (*Boletus edulis*) tuotannon välillä. Lisäksi selvitimme optimaalisia metsienkäsittelyyhdistelmiä tuottaa keruutuotteita ja puuta metsämaisematasolla samanaikaisesti.

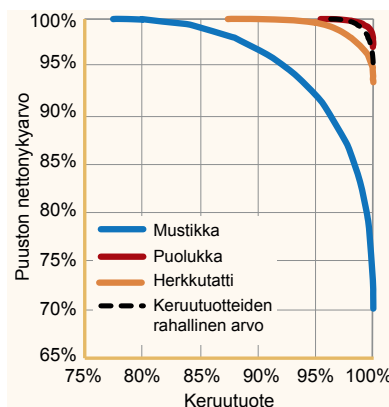
Aineistonamme oli metsämaisema (68 700 ha) Keski-Suomessa sisältäen lähes 30 000 metsäkuviota. Jokaista metsäkuviota simuloitiin Mottisimulaattorilla 50 vuotta eteenpäin käyttäen seitsemää erilaista metsänkäsittelytapaa. Käsittelyt olivat Tapion suositusten mukainen tasaikäisrakenteinen metsänkäsittely, täydellinen suojeleminen sekä viisi muunelmaa Tapiosta; kaksi käsittelyä pidennetyllä kierroksella (10 ja 30 vuodella), kaksi käsittelyä ilman harvennuksia (pidemmällä ja lyhyemmällä kiero-

ajalla), sekä käsittely suuremmalla säästöpuumäärällä. Simuloidusta aineistosta laskettiin jokaiselle metsäkuviolle puuntuotannon nettonykyarvo (NPV) 50 vuoden ajanjaksolle. Keruutuotesadot laskettiin kuvioille käyttämällä suomalaisia satomalleja. Lisäksi keruutuotteille laskettiin niiden yhdistetty potentiaalinen rahallinen arvo. Konfliktien ja optimaalisten käsittely-yhdistelmien selvittämiseksi käytimme monitavoite-optimointia.

Voimakkain konflikti oli mustikan ja puuntuotannon välillä (kuva 1). Mustikkasatoa oli mahdollista kasvattaa 23 %, mutta puuntuotannon arvo laski tällöin 30 % maksimaalisesta. Tutkimuksessa mukana olleiden metsänkäsittelyjen vaikutuksissa ei ollut suuria eroja puolukka- ja herkkutattisadoille, joten konfliktit muiden keruutuotteiden ja puuntuotannon välillä olivat hyvin pieniä. Jos puuntuotannon maksimista oltiin valmiita luopumaan 5 %, puolukka- ja herkuntattisadot sekä kaikkien kolmen keruutuotteen yhdistetty rahallinen arvo lähes maksimoituvat. Minkään yksittäisen käsittelytavan käyttäminen koko maisemassa ei tuottanut yhtä suurta kokonaisuutta kuin optimaaliset käsittely-yhdistelmät, jotka olivat erilaisia eri keruutuotteille. Mustikka hyötyi pidennetyistä kiertoajoista, puolukka Tapion suositusten mukaisesta käsittelystä sekä lyhyemmästä kiertoajasta, herkkutatti suuremmista säästöpuumääristä ja keruutuotteiden yhdistetty arvo pääasiassa samoista käsittelyistä kuin puolukka.

Suurin konflikti mustikan ja puuntuotannon välillä selittyy mm. sillä, että mustikka on esimerkiksi puolukkaa herkempi avohakkuille ja maanmuokkaukselle. Mustikan tiedetään hyötyvän pidemmistä kiertoajoista, mutta lisäksi myös lisääntyneistä harvennuksista, jotka tekevät valo-olosuhteet mustikalle paremmiksi. Viimeisimmät tutkimukset ovat osoittaneet, että sekä mustikka että puolukka hyötyvät käsittelystä, jossa metsä kasvaa harvempaan. Jatkuva metsänkasvatus, joka voi olla samanaikaisesti puuntuotannon kannalta tehokas vaihtoehto, voi olla hyvä käsittelyvaihtoehto sekä marjoille että sienille, ja tulisi sisällyttää tulevissa tutkimuksissa käsittelyvaihtoehtoihin.

Satomallit ennustavat puolukkasadot huomattavasti suuremmiksi kuin mustikkasadot. Todellisuudessa erot eivät ole niin suuria, mikä tulisi ottaa huomioon arvioitaessa keruutuotteiden rahallista arvoa. Me emme tutkimuksemme huomioineet

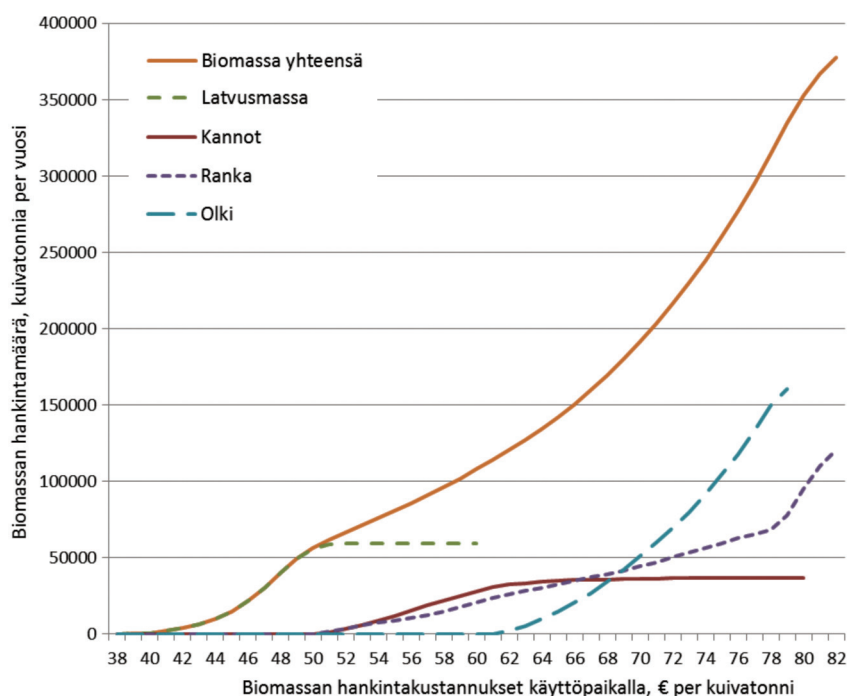


Kuva 1. Tuotantomahdollisuuksien käyrät eri keruutuotteille. y-akseli kuvaa puuntuotannon suhteellista arvoa maksimaalisesta ja x-akseli keruutuotteiden suhteellista arvoa maksimaalisesta. Käyrät perustuvat optimaaliseen yhdistelmään metsänkäsittelyä eri tavoitteiden kannalta. Käyrien muoto kuvaa tavoitteiden välisen ristiriidan suuruutta.

poimintakustannuksia vaan arvioimme ainoastaan maiseman maksimaalista kykyä tuottaa keruutuotesatoja. Keruutuotteiden satojen parantaminen valitsemalla niitä suosivia käsittelytapoja todennäköisesti kannustaisi keräämään keruutuotteita enemmän. Todellisuudessa kaikkien keruutuotteiden poimiminen metsästä ei ole kuitenkaan mahdollista eikä myöskään ekologisesti kestävä. Lisäksi on tärkeää pohtia, kuka keruutuotesadoista hyötyy, sillä Suomessa suurin osa metsistä on yksityisessä omistuksessa, joissa jokamiehen oikeudet mahdollistavat kaikille vapaan pääsyn poimimaan marjoja ja sieniä. Tämä luo haastavan asetelman, jossa ekosysteemi-palvelu on julkinen hyödyke, mutta jonka tarjonta riippuu metsänomistajan tekemistä metsäkäsittely-päätöksistä.

Tutkimuksemme osoitti, että metsämaisemassa on mahdollista tuottaa suuria määriä keruutuotteita ilman merkittäviä menetyksiä puuntuotantotuloissa. Tämä kuitenkin vaatii tarkkaa maisematason metsäsuunnittelua ja erilaisten metsänkäsittelytapojen yhdistelmiä. Keruutuotteiden huomioiminen metsien käsittelyssä olisi kannattavaa ja kannustaa kohti metsien monikäyttöä.

■ Maiju Peura & Mikko Mönkkönen: Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Sähköposti maiju.h.peura@jyu.fi



Kuva 1. Biomassan hankintamäärät raaka-ainelajeittain hankintakustannusten mukaan.

Ensimmäiset olkipaalit toimitettiin biojalostukseen, kun hankintakustannus oli 60 € kuivatonnilta ja biomassan hankintamäärä 110 000 kuivatonna vuodessa. Oljen kustannuskilpailukykyä heikensi sen huono tiiviys ja sen seurauksena korkeat paalaus ja kaukokuljetuskustannukset kuivatonna kohti lasketuna. Rangalla hankintakustannuksia nosti nuorten metsien harvennuksessa poistettavien runkojen pieni tilavuus ja siksi korkeat hakkuukustannukset. Päätehakuilta nostettavat kannot olivat tilavuudeltaan rankaa selvästi suurempia, mikä paransi nostotyön tuottavuutta ja hillitsi korjuukustannusten nousua.

Latvusmassalla oksabiomassan kasaustyön liittäminen osaksi ainespuun korjuuta vähensi kustannuksia erillisenä työvaiheena tehtäviin kantojen nosto- tai rangan hakkuutöihin verrattuna.

■ Juha Laitila, Perttu Anttila & Antti Asikainen, Luonnonvarakeskus (Luke), Joensuu; Eeva Lehtonen, Luke, Maaninka; Saija Rasi, Luke, Jyväskylä; Tapio Ranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikka
Sähköposti juha.laitila@luke.fi