

Tuomo Nurminen ja Jaakko Heinonen

Puutavaran autokuljetuksen ajanmenekki puunhankinnan nykytoimintaympäristössä

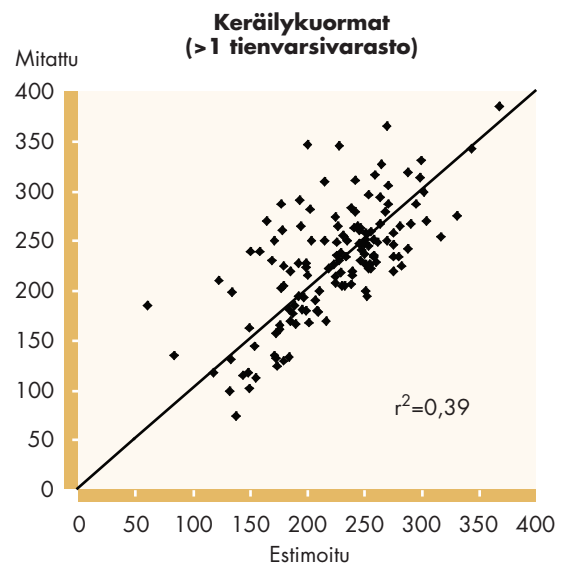
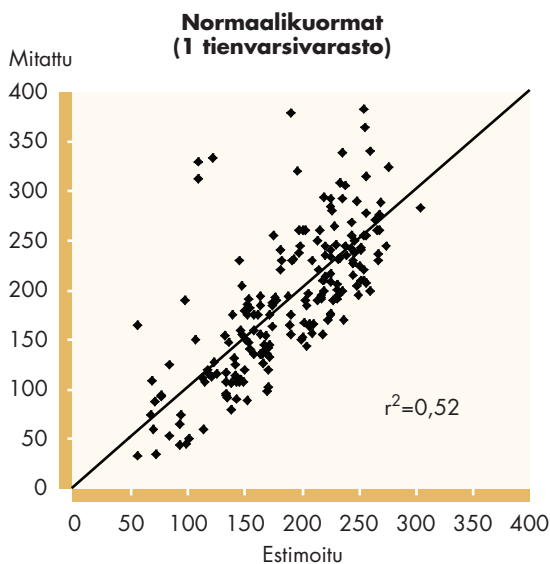
Seloste artikkelista: Nurminen, T. & Heinonen, J. 2007. Characteristics and time consumption of timber trucking in Finland. *Silva Fennica* 41(3): 471–487.

Metsäteollisuuden toimitusketjun muutosten myötä kaukokuljetuksen operatiivisesta toimintaympäristöstä on tullut entistä haasteellisempi. Raakapuun tehdastoimituksilta edellytetään kustannustehokkuutta ja joustavuutta. Kuljetuserien toimitusaikataulut ovat tiukat ja viivästys yksittäisessä kuljetustyövaiheessa voi vaikuttaa koko päivän

ajo-ohjelmaan. Myös toimitettavien puutavaralajien lukumäärä on kasvanut ja kuljetuserien koko pienentynyt. Merkittävä osa kuljetuksista toteutetaan ns. keräilyajona, jossa kuorma kerätään usealta tienvarsivarastolta. Tämä lisää kuljetusten ajanmenekkiä ja nostaa kustannuksia.

Tutkimuksen tavoitteena oli laatia suomalaisen puunhankinnan nykytoimintaympäristöä vastaavat ajanmenekkimallit puutavaran autokuljetuksen työvaiheille ja kokonaisajalle. Analyysi rajattiin koskemaan varsinaista kuljetusaikaa eli kuljettajien työvuoroja. Tämän lisäksi tutkimuksessa esitetään tilastollinen menetelmä kuljetusajan vaihtelun (luottamusvälin) laskemiseksi.

Tutkimus toteutettiin yhdistettynä aika- ja seurantatutkimuksena Keski-Suomessa loppukesällä 2005. Kuukauden tutkimusjaksolla tutkimukseen osallistui 13 puutavara-auton kuljettajaa ja 8 ajoneuvoyhdistelmää. Aikatutkimuksessa työntutkija istui puuta-



Kuva 1. Mitatun (y-akseli) ja estimoidun (x-akseli) kuljetusajanmenekin (min/kuorma) välinen korrelaatio.

vara-autojen kyydissä ja keräsi tietoa työvaiheiden ajanmenekistä, kuljetusmatkoista, kuljetuserien tilavuudesta ja muista työhön vaikuttavista tekijöistä. Seurantaosiossa kuljettajat rekisteröivät itsenäisesti vastaavat tiedot työvuoronsa kuluessa lomakkeelle. Aineisto koostui 66 aikatutkimuskuormasta (3 300 m³) ja 302 seurantakuormasta (14 569 m³).

Ajanmenekkimallit laadittiin päätyövaiheittain (ajo tyhjänä, varastoaika, keräilyajo, ajo kuormattuna, purkamisen, muu ajo, keskeytykset). Ajotyövaiheiden osalta hyödynnettiin epälineaarista regressiota, muiden työvaiheiden osalta sovellettiin aineiston keskitunnuksia. Ajanmenekkiä selittäviksi muuttujiksi valittiin: ajomatka, tienvarsivarastojen lukumäärä, puutavaralaji ja kuorman tilavuus. Kokonaiskuljetusaika estimoitii työvaihemallien summana. Kuljetusten ajanmenekin vaihtelua analysoitiin lognormaaliin jakaamaan perustuvalla menetelmällä. Sekä yksittäisen työvaiheen että kuorman kokonaisajan estimaatille voitiin näin määrittellä 95 %:n luottamusväli.

Puutavaran autokuljetusten ajanmenekkiin vaikuttavat edellä mainittujen muuttujien lisäksi monet tekijät, kuten tiestön kunto, olosuhteet toimituskohteen puun vastaanotossa, vuodenaika, kalusto ja kuljettaja. Tutkimusaineistossa ajanmenekin vaihtelu olikin suurta (kuva 1). Keräilykuormien ajanmenekkiä ja ajanmenekin vaihtelua lisäsivät entisestään ylimääräinen ajo varastojen välillä sekä kuormauksen aputyövaiheiden toistuminen jokaisella varastopaikalla.

Kuljetustyöhön liittyvä suuri ajanmenekki vaihtelu ja olosuhderiippuvuus tulisi muistaa kuljetusten ohjauksessa, jonka taustalla on usein laajojen aluiden puuvirtojen optimointi. Toimitusketjun tuotevalinnat vaikuttavat puutavaran katkonnan kautta suoraan operatiiviseen ympäristöön ja siten logistisiin kustannuksiin. Ajanmenekillä ja sen vaihtelulla on myös kuljetusyrityksen kustannusten ja hinnoittelun kannalta keskeinen merkitys.

Tämän tutkimuksen tulokset toimivat osaltaan päätöksenteon tukena sekä kuljetusyrityksille että metsäteollisuudelle. Tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi puutavaran katkonnan ja kuljetusten optimoinnin tutkimuksessa sekä kustannuslaskelmissa.

■ MMM Tuomo Nurminen, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta ja Metsätoimisto Tuomo Nurminen; VTM Jaakko Heinonen, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun yksikkö. Sähköposti tuomo.nurminen@metsatoimisto.fi

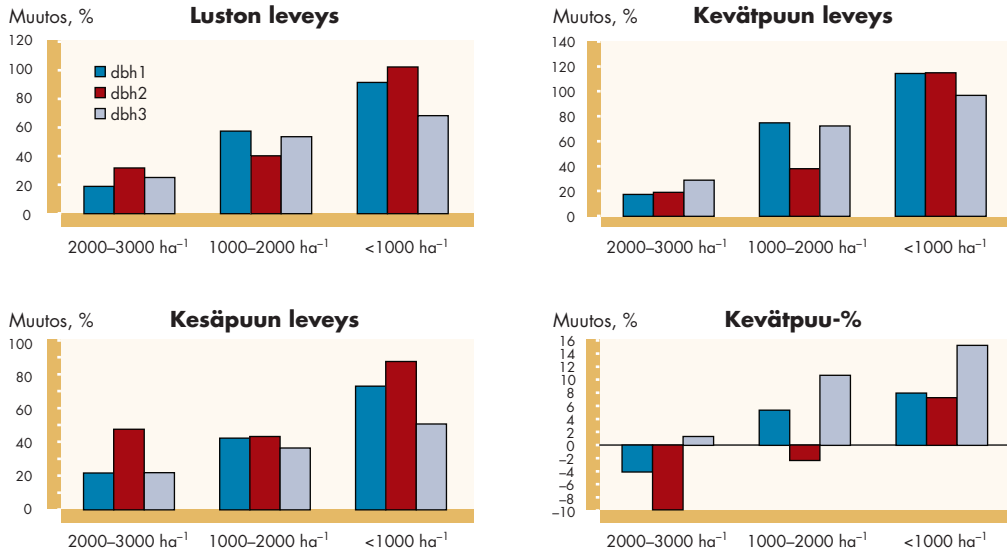
Heli Peltola, Antti Kilpeläinen, Kari Sauvala, Tommi Räisänen ja Veli-Pekka Ikonen

Ensiharvennuksen ja puun metsikköaseman vaikutus männyn sädekasvuun ja puuaineen tiheyteen

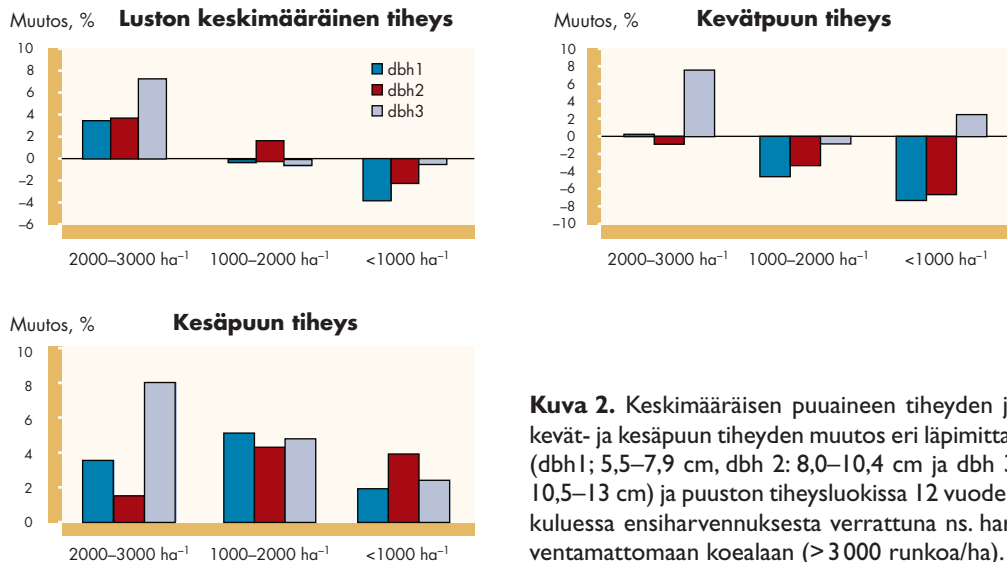
Seloste artikkelista: Peltola, H., Kilpeläinen, A., Sauvala, K., Räisänen, T. & Ikonen, V.-P. 2007. Effects of early thinning regime and tree status on the radial growth and wood density of Scots pine. *Silva Fennica* 41(3): 489–505.

Tutkimuksessa selvitettiin miten ensiharvennus ja puun metsikköasema vaikuttavat männyn sädekasvuun ja puuaineen tiheyteen kuivahkolla kankaalla Itä-Suomessa. Kaiken kaikkiaan 10 eri harvennuskoealalta (tiheysvaihtelu 575–3 400 runkoa/ha) otetusta 98 koepuusta analysoitiin ITRAX-röntgenmittausten avulla vuosiluston leveys, kevät- ja kesäpuun leveys ja niiden osuudet sekä keskimääräinen luston tiheys ja kevät- ja kesäpuun tiheys rinnankorkeudelta 12 vuotta ensiharvennuksen jälkeen. Em. koepuut valittiin kultakin koealalta siten, että ne edustivat mahdollisimman hyvin eri koealojen keskimääräistä läpimittajakaumaa. Harvennusvoimakkuuden vaikutusta tuloksiin tarkasteltiin sekä erikseen kolmessa puuston kokoluokassa (5,5–7,9 cm, 8,0–10,4 cm ja 10,5–13 cm) että keskimäärin eri kokoluokissa. Em. harvennusvoimakkuuden vaikutuksen analysoimiseksi harvennuskoealat ryhmiteltiin harvennuksen jälkeen jäävän tiheyden perusteella neljään eri tiheysluokkaan: alle 1 000 runkoa/ha (2 koealaa, voimakas harvennus), 1 000–2 000 runkoa/ha (3 koealaa, kohtalainen harvennus), 2 000–3 000 runkoa/ha (3 koealaa, lievä harvennus) ja yli 3 000 runkoa/ha (2 koealaa, ns. harventamaton vaihtoehto).

Harvennus lisäsi merkittävästi puuston sädekasvua verrattuna harventamattomaan käsittelyyn, ja lisäys oli suurin kookkaimmissa koepuissa (kuva 1). Tästä huolimatta, keskimääräinen puuaineen tiheys 12 vuoden kuluessa ensiharvennuksesta ei vähentynyt merkittävästi edes voimakkaan ensiharvennuksen seurauksena (kuva 2). Itse asiassa keskimääräinen puuaineen tiheys



Kuva 1. Keskimääräisen luston leveyden, kevät- ja kesäpuun leveyden ja kevätpuu-%:n muutos eri läpimitta- (dbh1: 5,5–7,9 cm, dbh 2: 8,0–10,4 cm ja dbh 3: 10,5–13 cm) ja puuston tiheysluokissa 12 vuoden kuluessa ensiharvennuksesta verrattuna ns. harventamattomaan koelaan (> 3 000 runkoa/ha).



Kuva 2. Keskimääräisen puuaineen tiheyden ja kevät- ja kesäpuun tiheyden muutos eri läpimitta- (dbh1: 5,5–7,9 cm, dbh 2: 8,0–10,4 cm ja dbh 3: 10,5–13 cm) ja puuston tiheysluokissa 12 vuoden kuluessa ensiharvennuksesta verrattuna ns. harventamattomaan koelaan (> 3 000 runkoa/ha).

oli vain 2 % alhaisempi voimakkaan harvennuksen seurauksena verrattuna harventamattomaan vaihtoehtoon; erot olivat myös vähäisemmät valtapuilla verrattuna vallittuihin puihin (vaihtelu 1–4 % kookkaimman ja pienimmän koepuuluokan välillä). Vastaavasti lievä

harvennus jopa lisäsi keskimääräistä puuaineen tiheyttä verrattuna harventamattomaan vaihtoehtoon (keskimäärin 5 %, vaihtelun ollessa 4–7 % pienten ja suurten puiden välillä). Ns. kohtalaisen voimakkaan harvennuksen osalta vaikutukset eivät olleet yhtä sel-

viä. Kaiken kaikkiaan puun metsikköasema vaikutti merkittävästi harvennuksen vaikutukseen. Lisääntynyt puuston sädekasvu johtui myös sekä kevät- että kesäpuun leveyden yhtäaikaisesta lisäyksestä. Suhteellisen vähäinen keskimääräisen puuaineen tiheyden muutos johtui vastaavasti siitä, että vaikka kevätpuun tiheys hieman laski harvennuksen seurauksena, vastaavasti kesäpuun tiheys nousi.

Verrattaessa eri harvennusvoimakkuuksia keskenään voidaan myös todeta, että voimakas ensiharvennus lisäsi puuston sädekasvua 9–20 % (riippuen puun metsikköasemasta) verrattuna viime vuosien metsänhoitokäytäntöjen mukaiseen harvennuksen männyllä Etelä-Suomessa (jäävä tiheys noin 1 100–1 300 runkoa/ha). Toisaalta keskimääräinen puuaineen tiheys laski kuitenkin vain 0–4 % riippuen puun metsikköasemasta. Tämän perusteella voitaneen olettaa, ettei Hyvän metsänhoitosuosituksen (2006) mukaiset ensiharvennuksen jälkeiset suositustiheydet (700–1 200 runkoa/ha) aiheuttane vastaavilla kasvupaikkatyypeillä männyllä merkittävää puuaineen tiheyden alenemista.

■ MMT Heli Peltola, MMM Antti Kilpeläinen, MMM Tommi Räisänen, MMM Veli-Pekka Ikonen, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta; mtt Kari Sauvala, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö
Sähköposti heli.peltola@joensuu.fi

Mikko Peltoniemi, Juha Heikkinen ja Raisa Mäkipää

Koealojen valitseminen maahiiliotantaan simuloitujen muutoksien perusteella

Seloste artikkelista: Peltoniemi, M., Heikkinen, J. & Mäkipää, R. 2007. Stratification of regional sampling by model-predicted changes of carbon stocks in forested mineral soils. *Silva Fennica* 41(3): 527–539.

Maaperän hiilivaraston muutoksen seuraaminen toistuvilla mittauksilla on suoraviivaisin tapa

arvioida maaperän vastetta ilmaston lämpenemiselle ja erilaisille ihmisen toimille. Maaperän hiilivaraston muutoksen mittaaminen on kuitenkin työlästä, koska muutokset ovat pieniä suhteessa varastojen kokoon ja koska maan ominaisuudet vaihtelevat suuresti jo pienellä pinta-alalla. Luotettavien alueellisten keskiarvojen arvioimiseksi on siis mitattava erittäin suuri joukko koealoja, minkä vuoksi seurannan kustannukset ovat korkeat. Ositettu otanta on vanha ja tehokas keino parantaa otannan tehokkuutta, mutta sitä on sovellettu hyvin vähän maaperän muuttujille.

Selostetussa tutkimuksessa tarkasteltiin kuinka paljon maaperän hiilivaraston (kuollut karike ja mineraalimaa 100 cm:n syvyyteen) simuloitujen muutoksien perusteella tehty koealojen otannan ositus pienentäisi otannan keskivirhettä. Maaperän prosessien simulointi, maaperän hiilivaraston muutoksien mittaaminen sekä tulevaisuuden skenaariot sisältävät huomattavia epävarmuuksia. Työssä selvitettiin kunpa paljon näiden epävarmuuslähteiden voidaan olettaa laskevan osituksen tehokkuutta ja parantaisiko epävarmuuksien ennakoiti osituksen tehokkuutta.

Testipopulaationa käytettiin VMI:n perustamien pysyvien koealojen mittauksia. Koealojen vuonna 1995 mitattujen metsikkötietojen perusteella simuloitiin seuraavan kymmenen vuoden maahiilivarastojen kehitys yhteensä 1 719 koealalla, jotka sijaisivat eri puolilla Suomea ja kivennäismaalla. Metsikön harvennusten ja päätehakkuiden oletettiin tapahtuvan Tapion metsänkäsittelysuositusten mukaisesti. Metsikköjä simuloitiin *MOTTI*-metsikkömallilla ja maaperän hajoitusta *Yasso*-maamallilla.

Koealat jaettiin ositteisiin Dalenius-Hodges -menetelmällä. Koska simuloidut koealojen ennusteet ovat välttämättäkin epävarmoja, lisättiin malliennusteisiin satunnainen virhekomponentti, joka kuvasi mallivirhettä. Simuloituihin ennusteisiin lisättiin myös satunnaiskomponentti, joka kuvasi mitattujen hiilivaraston muutoksien ennakoitua epäluotettavuutta. Tämän virhekomponentin ennuste johdettiin koealakohtaisesta maanäytteiden lukumäärästä. Otannan simulointia varten muodostettiin joukko toisistaan riippumattomia kohdepopulaatioita, jotka kuvasivat metsikköjen käsittelyskenaarioiden, sekä malli- ja mittausvirheiden mahdollisia realisaatioita erisuuruksilla virheoletuksilla. Varsinainen otannan

simulointi toteutettiin valitsemalla kohdepopulaatioista 250 koealaa ja laskemalla näytteistä keskiarvon keskivirhe eri allokointimenetelmillä ja eri määrällä ositteita.

Tutkimuksen tuloksien perusteella otannan osituksella (esimerkkinä 4 ositetta ja Neymanin allokatio) voitaisiin nostaa otannan tehokkuutta 9–34 % suhteessa satunnaiseen koealojen valintaan, kun kultakin koealalta otetaan 10 toistuvaa maanäytettä parittomalla otannalla. Laaja vaihteluväli riippuu metsikköjen käsittelyskenaarioiden sekä mallivirheiden oletuksista. Mikäli malli- ja mittausvirheet jätettiin huomioimatta osituksessa, yllä ilmoitetut tehokkuuden parannukset olivat 2–9 %-yksikköä pienempiä.

Suurimmat simuloitut koealakohtaiset maahiilivaraston muutokset liittyivät metsikköjen päätehakkuihin ja harvennuksiin. Ositetun otannan tehokkuutta voitaisiin parhaiten parantaa, mikäli metsänkäsittelyä pystyttäisiin ennakoimaan paremmin, ja mikäli maaperän hiilen kehityksen simuloinnin luottavuutta näissä tilanteissa pystyttäisiin parantamaan. Pitkällä aikavälillä ilmastonmuutos voi aiheuttaa trendinomaisia muutoksia maaperän hiilivarastoissa. Ositettu otanta, joka huomioisi tiettyjen ekosysteemi- tai koealojen herkkyyden ilmastonmuutokselle, voisi tarjota parannuksia pitkän aikavälin seurannan tehokkuuteen. Tämä aihe vaatii kuitenkin lisätutkimuksia.

Maaperän ilmiöiden tunnustetusta epävarmuudesta huolimatta, vaikuttaa siltä, että ositetulla otannalla voidaan saavuttaa pieniä parannuksia otannan tehokkuuteen. Pienet parannukset otantatehokkuudessa voivat laskea kustannuksia merkittävästi, kun otanta ulottuu laajoille alueille.

■ FM Mikko Peltoniemi, FT Juha Heikkinen, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö
Sähköposti mikko.peltoniemi@metla.fi,
juha.heikkinen@metla.fi

Mikko Peltoniemi, Taru Palosuo,
Jari Liski ja Raisa Mäkipää

Mallit metsämaan hiilivarastojen ennustajina

Seloste artikkelista: Peltoniemi, M., Thürig, E., Ogle, S., Palosuo, T., Schrumpf, M., Wutzler, T., Butterbach-Bahl, K., Chertov, O., Komarov, A., Mikhailov, A., Gärdenäs, A., Perry, C., Liski, J., Smith, P. & Mäkipää, R. 2007. Models in country scale carbon accounting of forest soils. *Silva Fennica* 41(3): 575–602.

Ilmastonmuutos ja sen hidastamiseen pyrkivä Kioton sopimus ovat luoneet tarpeen tuottaa maakohtaisia ennusteita metsämaan maaperän hiilivaraston muutoksista. Useimmat maat eivät tule soveltamaan empiiristä mittausten menetelmää sen työläyden ja korkeiden kustannuksien vuoksi. Nämä maat raportoivat, tai suunnittelevat raportoivansa, maaperän hiilivaraston muutoksen malliennustuksiin perustuen. Lähestymistapa on IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) raportointiohjeiston sallima. Myös Suomi käyttää mallipohjaista lähestymistapaa metsämaan (kivennäismaat) hiilivarastojen raportoimisessa.

Selostetussa tutkimuksessa tarkasteltiin seitsemää yleisesti käytettyä mallia (prosessimallit *Century*, *Forest-DNDC*, *ROMUL*, *RothC*, *SOILN*, *Yasso*, ja tilastollinen malli *Forcarb*), joita voidaan käyttää maaperän hiilivarastojen muutosennusteiden tuottamiseen. Malleja arviointiin sen perusteella kuinka ne soveltuisivat maan hiilivarastojen muutosennusteiden tuottamiseen laajalla maantieteellisellä alueella. Työssä luetteloiitiin lisäksi olemassa olevat empiiriset tutkimukset, joissa on seurattu metsämaan maaperän hiilivarastojen kehitystä ekosysteemi- tai kansallisella tasolla, ja joita voitaisiin käyttää mm. esiteltyjen mallien testaamiseen ja kalibrointiin. Tutkimusartikkeli nostaa esille myös keskeisimpiä ongelmia, jotka liittyvät mallien käyttöön suoraluetasolla, sekä ongelmia, jotka liittyvät mallien ja mittausten yhdistämiseen.

Malleista *Century*, *Forest-DNDC*, *SOILN* ja *ROMUL* ovat ensisijaisesti suunniteltu yhteiskäyttöön mallien kasvillisuutta kuvaavien osien kanssa. Näiden mallien käyttö vaatii paljon lähtötietoja ja niiden soveltaminen laajalla alueella vaatii paljon oletuksia puuttuvista parametreista. *RothC* ja *Yasso* ovat itsenäisiä maamal-

leja, joiden käyttö on suoraviivaista eikä vaadi paljon lähtötietoja. Monimutkaiset mallit kuvaavat hajotusprosessin siihen liittyvine muuttujineen tarkemmin ja ennustavat lähtökohtaisesti suurempaa alueellista vaihtelua hiilivarastoissa ja niiden muutoksissa. Kaikkea tarvittavaa tietoa ei kuitenkaan ole saatavilla alueellisella tasolla tai mallin aikaresoluutiolla, joten monimutkaisten mallien käyttö perustuisi osittain oletuksiin ja ennustuksiin puuttuvista lähtötiedoista.

Suuraluotason mittaustietoa metsämaan hiilivarastoista on saatavilla hyvin vähän mallien testausta ja kalibrointia varten. Jos mittaustietoa on olemassa, se on harvoin sovellettavissa sellaisenaan malleille, koska mallien käyttämät määritelmät poikkeavat mittaushojeistuksien määritelmistä. Mallien testausta ja kalibrointia hankaloittaa usein myös puuttuvat koealakohtaiset mittaukset maaperän prosesseihin vaikuttavista muuttujista, sekä maaperätunnusten mittausten huomattavat epävarmuudet. Toisaalta maamallien rakenne ei useinkaan tarjoa mahdollisuutta niiden testaamiselle. Mittauksien suunnittelussa tulisi ottaa huomioon maamallien vaatimukset entistä tarkemmin, ja toisin päin.

Monet maamallit eivät tee suurtakaan eroa hiilivarastojen simuloinnissa eri maankäyttöluokkien välillä. Simuloitu prosessi on identtinen, mutta parametrisointia on saatettu muuttaa. Esimerkiksi tämän työn malleista *RothC*, *Century*, *SOILN* ja *Forest-DNDC* on kehitetty alunperin maatalous- tai ruohikkomailla, mutta niitä käytetään yleisesti myös metsämaalle. Orgaanisten maiden tapauksessa hajotusprosessi tunnetusti muuttuu, mutta silti orgaanisten maiden mallikehitys perustuu olemassa oleville malleille. Esimerkiksi *RothC*:stä ja *Romul*:sta on tekeillä orgaanisille maille soveltuvat versiot, ja *DNDC*:stä tällainen versio jo on. Yhtenäinen menettely ja simuloitujen muuttujien määritelmät eri maankäyttöluokkien yli minimoisivat mallinnusvirheiden mahdollisuuden maankäytön muutoksien tapahtuessa.

Maamallinnukseen liittyvien suurien epävarmuuksien vuoksi, olisi syytä käyttää useita malleja ennusteiden tekemiseen, jolloin mittausdatan puuttuessaakin, saataisiin tietoa malliennusteiden luotettavuudesta.

■ FM Mikko Peltoniemi, MMT Raisa Mäkipää, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö
Sähköposti mikko.peltoniemi@metla.fi,
raisa.makipaa@metla.fi

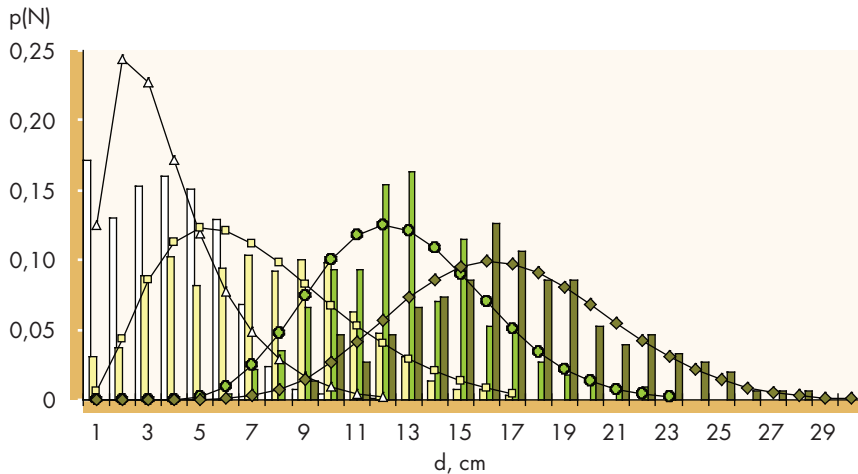
Jouni Siipilehto, Sakari Sarkkola ja
Lauri Mehtätalo

Regressiomenetelmien vertailu männiköiden läpimittajakaumien ennustamiseksi ojitusalueilla

Seloste artikkelista: Siipilehto, J., Sarkkola, S. & Mehtätalo, L. 2007. Comparing regression estimation techniques when predicting diameter distributions of Scots pine on drained peatlands. *Silva Fennica* 41 (2): 333–349.

Puuston läpimittajakauma on tärkeä metsikön rakenteen kuvaaja, joka mahdollistaa mm. puuston ja puutavaralajien tilavuuden laskennan. Läpimittajakaumien kuvaamiseen ja ennustamiseen liittyviä menetelmiä on tutkittu viime vuosina paljon varsinkin kivennäismailla, joiden puustoille on laadittu metsikön pohjapinta-alaan perustuvia läpimittajakaumien ennustemalleja. Turvemaiden metsikoille relevantteja käytäntöön soveltuvia läpimittajakaumien ennustamisvälineitä ei ole kuitenkaan juurikaan tehty. Ne ovat kuitenkin jatkossa välttämättömiä, koska ojitusalueiden metsätaloudellinen merkitys kasvaa jatkuvasti. Ennustemallit voidaan tehdä suoraan aineistoon sovitettujen läpimittajakaumien parametreille, kuten tässä tutkimuksessa. Vaihtoehtoisesti voitaisiin ennustaa/mitata jakauman momentteja tai jakauman prosentiosuuksia, joiden avulla jakaumaparametrit ratkaistaan yhtälöryhmistä.

Tutkimuksessa vertailtiin erilaisia tilastollisia menetelmiä sovitettaessa lineaarisia regressiomalleja metsikköaikasarja-aineistoon puustojen pohjapinta-alan läpimittajakaumien ennustamiseksi. Mallinnuskohteina olivat ojitetut rämemänniköt. Läpimittajakaumat kuvattiin Johnsonin S_B -jakauman avulla. Parametriennustemallit jakauman kahdelle parametrille olivat: 1) pienimmän neliösumman lineaarinen malli (OLS), 2) monivastemalli (seemingly unrelated regression, SUR), 3) lineaarinen sekamalli (MIX) ja satunnaisvaikutuksen sisältänyt monivastemalli (MSUR). Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, kuinka toisaalta aineiston hierarkkisyyden ja toisaalta yhtä aikaa estimoitavien mallien keskinäisen korrelaation huomioonottaminen vaikutti regressiomallien sovitukseen ja malleilla tuotettuihin ennusteisiin.



Kuva 1. Erään Vilppulan Jaakkoinsuon koelan havaitut ja ennustetut männyn läpimittajakaumat vasemmalta oikealle on projisoitu 25, 39, 48 ja 62 vuotta ojituksen jälkeen. Puuston tiheydet olivat 4 700, 3 920, 1 510 ja 1 010 runkoa hehtaarilla. MSUR-mallin ennuste yliarvioi korkeisia runkolukuja 8,5, 3,6, 2,9 ja 2,8 prosenttia.

Tutkimusaineisto koostui 112 toistuvasti mitatusta metsikkökoelasta eri puolella Suomea sijaitsevalta 12 koekentältä. Kaikkiaan mittaushavaintoja oli 608 toistomittaukset huomioiden. Mallien testiaineistoina käytettiin turvemaalle perustettuja Metlan harvennuskokeiden koaloja sekä kangasmaalle perustettuja mäntyvaltaisia, VMI-otokseen perustuvia pysyviä INKA-kokeita. Vaihtoehtoisten mallien luotettavuutta tarkasteltiin ennustetuista jakaumista generoitujen puustotunnusten, kuten runkoluvun, tilavuuden ja puuston arvon suhteen mallinnus- ja testiaineistoissa. Varsinaisen puuston tilavuuden tai arvon sijaan mittareina käytettiin läpimitan kolmannen (Σd^3) ja neljännen kertaluvun summia (Σd^4), jolloin puiden pituustietoa ei tarvittu. Luotettavuutta mitattiin suhteellisen harhan, keskivirheen ja tarkkuuden (virheen keskihajonnan) avulla.

Kaikki laaditut mallit tuottivat luotettavia puustotunnuksia. Tarkastelu osoitti kuitenkin, että aineiston hierarkkisyyden ja regressioyhtälöiden jäännösvirheiden välisen korrelaation ($r=0,74$) huomioonottaminen paransi ennusteita verrattuna OLS-malliin. Jälkimmäinen vaikutti ratkaisevasti tulokseen, niinpä SUR- ja MSUR-mallit osoittautuivat luotettavammiksi kuin MIX-malli. Koska MSUR-malli oli teoreettisesti perusteellisempi ja se tuotti hyviä ennusteita, sitä voidaan suositella käytännön metsätaloussuunnittelun tarpeisiin (ks. kuva 1).

■ MML Jouni Siipilehto, MMT Sakari Sarkkola, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö; MMT Lauri Mehtätalo, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta
Sähköposti jouni.siipilehto@metla.fi