

Jari Hynynen

## Puuston kehityssuunnusteiden luotettavuuden parantaminen tutkimuksen haasteena

### Johdanto

Metsänkasvatuksen tutkimus on soveltavaa tutkimusta, jonka tuloksia kysytään ja joita sovelletaan konkreettisisä käytännön päätöksentekotilanteissa. Tutkimustietoa arvostetaan käytännön päätöksenteon tukena, koska se koetaan riippumattomaksi ja luotettavaksi. Luotettavuuteen sisältyy tutkimusprosessin läpinäkyvyys; tutkimuksen eri vaiheet on dokumentoitu avoimesti ja täsmällisesti niin, että koko tutkimus on tarvittaessa toistettavissa. Tutkimustulosten raportointiin tulisi aina sisältyä se, että uuden tutkimustiedon osalta kerrotaan myös se epävarmuus, joka esitettävään tietoon liittyy. Se lisää merkittävästi saadun tutkimuksen arvoa tiedon soveltajan näkökulmasta. Metsänkäsitteilyyn liittyy lähes poikkeuksetta jonkin asteinen riski. Kun metsänkäsitteilyä koskevia päätöksiä tehdään, lopulliseen valintaan eri vaihtoehtojen välillä vaikuttaa odotettavissa olevan lopputuloksen lisäksi varmasti myös se, miten suuret riskit käsittelyihin sisältyvät.

Metsätalouden toimintaympäristössä muutoksia tuntuu tapahtuvan yhä kiihtyvällä vauhdilla. Taloudelliseen toimintaympäristön suuria muutoksia ovat mm. puun kysynnän ja tarjonnan muuttuminen niin globaalisti kuin myös Suomen mittakaavassa. Puun käytön osalta energiapuun merkitys näyttäisi olevan kasvamassa jopa ennakoitua nopeammin. Jo vuosia on keskusteltu metsien suojelun ja monimuotoisuuden ylläpitämisen tavoiteltavasta tasosta ja keinoista

tavoitteiden saavuttamiseksi. Ekologisista muutoksista suuren kokoluokan avoin ja ajankohtainen kysymys on varautuminen ilmastonmuutokseen metsien käsittelyssä. Muutosten aikana toimintaan liittyvä epävarmuus lisääntyy. Tällöin tutkimuksen asema korostuu ja sen tehtävänä on osaltaan auttaa vähentämään epävarmuutta.

Tarkastelen seuraavassa kasvu- ja tuotostutkimuksen näkökulmasta muutamia näkökohtia ja haasteita, jotka liittyvät tutkimustiedon luotettavuuteen ja tutkimusmenetelmiin.

### Tutkimustuloksiin liittyvä epävarmuus ja sen hallinta kasvu- ja tuotostutkimuksessa

Metsän kasvatuksessa sen enempää käytännön toimintaa kuin tutkimustakaan ei voida toteuttaa kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa, vaan työtä ja tutkimusta tehdään metsässä ja ”luonnon armoilla”. Luonnossa metsien kehitykseen sisältyy aina vaihtelua. Kasvu- ja tuotostutkimuksen yksi tärkeimmistä tehtävistä on selvittää puuston kehityksessä esiintyvän vaihtelun syitä, sekä tunnistaa tuosta vaihtelusta se osa, jota voimme puuston käsittelyn avulla kontrolloida niin, että kehitystä voidaan ohjata haluttuun suuntaan.

Kasvu- ja tuotostutkimuksessa metsänkäsitteilyn vaikutuksia on perinteisesti tutkittu järjestettyjen metsikkökokeiden avulla. Ne perustetaan kasvuolosuhteiltaan ja puustoltaan tasaisiin metsiin, joissa

mitattavissa oleva vaihtelu on mahdollisimman vähäistä. Koemetsiköihin rajatuilla koealoilla sovelletaan erilaisia tarkkaan määriteltyjä käsittelyitä. Koejärjestelyn avulla pyritään minimoimaan kaikki kontrolloimaton vaihtelu, jotta kulloinkin tutkittavan käsittelyn vaikutus saataisiin mahdollisimman puhtaana esiin. Siitä huolimatta näillä kontrolloiduilla käsittelykokeilla on huomattava määrä sellaista vaihtelua, joka ei johdu käsittelystä. Esimerkiksi yhdellä pitkään seuratulla kuusikon harvennuskokeella samalla tavoin käsitellyillä koeruuduilla 37 vuoden tilavuuskasvun variaatiokerroin (keskihajonta/keskiarvo) oli keskimäärin 10 prosenttia. Käytännön talousmetsissä vastaava vaihtelu on vielä paljon suurempaa. Luontaisen vaihtelun olemassaolo on tosiasia, joka on syytä muistaa niin tutkimusta tehtäessä kuin käytännön toiminnassakin. Ei ole näköpiirissä sellaisia tutkimusmenetelmiä, joiden avulla kaikki esiintyvä vaihtelu voitaisiin selittää, saati sellaisia käytännön menetelmiä, joilla kaikki ei-toivottu vaihtelu voitaisiin eliminoida.

Metsänkäsittelyn vaikutuksia on paljon tutkittu järjestettyjen käsittelykokeiden avulla. Mittaustuloksia analysoidaan tilastollisilla menetelmillä, joiden avulla voidaan selvittää puuston käsittelystä johtuva osuus kokonaisvaihtelusta ja lisäksi käsittelystä riippumattoman selittämättömän vaihtelun suuruus. Sen perusteella voidaan tutkimusraportissa kertoa käsittelyvaikutuksen määrän lisäksi myös tietoa siitä, miten suuri epävarmuus saatuun tulokseen sisältyy.

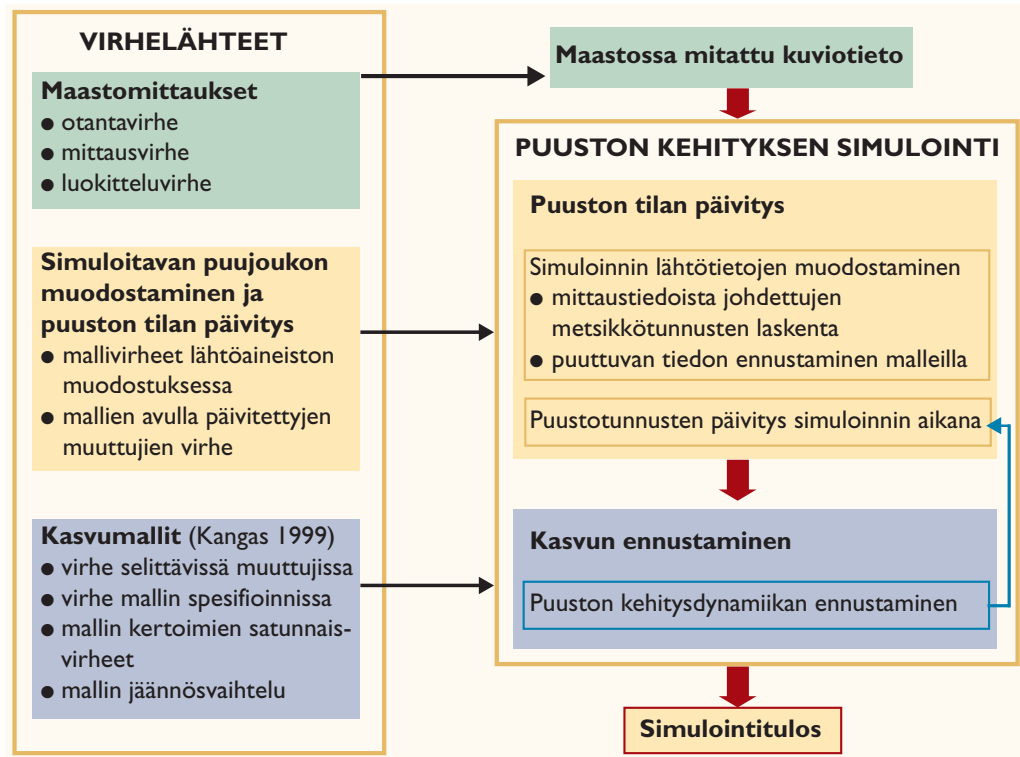
Metsänkäsittelykokeista saatavien tutkimustulosten sovellettavuuteen liittyy kuitenkin merkittäviä rajoituksia. Tuloksia voidaan sellaisenaan soveltaa vain tilanteisiin, joissa olosuhteet ja käsittelyt ovat samanlaisia kuin mitatuissa kokeissa. Tulosten soveltavuutta on pyritty laajentamaan kokoamalla metsikkökokeilta tai puustoinventoinneissa kerättyjä mittaustuloksia laajoiksi aineistoiksi ja laatimalla niiden pohjalta tilastollisia ennustemalleja. Malleissa laadinta-aineistoista mitatut kasvutekijöiden vaikutukset puuston kehitykseen formuloidaan matemaattiseen muotoon. Parhaimmillaan mallien avulla pystytään kuvaamaan puuston kehitykseen liittyvät yleiset säännönmukaisuudet ja riippuvuudet sekä puuston reaktiot metsänkäsittelyihin varsin realistisesti. Malli on kuitenkin yksinkertaistettu ja yleistetty kuvaus todellisuudesta, ja osa vaihtelusta

jää aina selittämättä. Tilastollisiin malleihin sisältyy mallin antamaan ennusteen (odotusarvon) lisäksi myös mallivirhe eli epävarmuus, joka suuruus riippuu siitä osasta vaihtelua, jota mallilla ei pystytä selittämään.

Yksittäinen malli ennustaa usein vain tietyn puun tai metsikkötunnuksen kehitystä ja sen riippuvuutta kasvuolosuhteista tai toteutetusta käsittelystä. Esimerkiksi puun läpimitan kasvumallin avulla saadaan ennuste siitä miten paljon puuston harvennus tai harventamattomuus vaikuttaa läpimitan kasvuun. Käytännön metsätaloudessa harvennusohjelman valintaan vaikuttavat myös monet muut näkökohdat kuin puiden kasvureaktion suuruus. Metsänkasvatuksen kannattavuuden kannalta on oleellista tietää, miten paljon hakkuutulot lisääntyvät ja mitä toimenpiteiden toteutus maksaa. Myös muut kuin taloudelliset arvot vaikuttavat metsien käsittelymenetelmien valintaan, kuten eri harvennuskäsittelyjen vaikutukset metsän monimuotoisuuteen, esimerkiksi lahoppuun määrään ja sen kehittymiseen metsässä. Myös toimintaan liittyvät biologiset ja taloudelliset riskit halutaan tuntea ennen kuin uusia toimenpiteitä otetaan käyttöön.

Metsänkäsittelypäätöksiä tehtäessä tarvitaan siten monipuolista tietoa toimenpiteiden vaikutuksista. Tutkimuksessa onkin viime vuosina panostettu paljon sellaisten menetelmien kehittämiseen, joiden avulla voidaan muodostaa synteisiä eri alojen tutkimustiedosta. Metsikkösimulaattorit ovat tätä varten kehitettyjä analyyysityökaluja ja päätöksenteon apuvälineitä.

Metsikkösimulaattoreihin on koottu suuri joukko erilaisia ennustemalleja. Useista eri osamalleista koostuvista ohjelmistoista kehittyi kuitenkin helposti hyvin monimutkaisia ja vaikeasti hallittavia järjestelmiä. Sen vuoksi simulaattoreiden toteutuksessa on jouduttu tekemään paljon yksinkertaistuksia ja yleistyksiä. Yksi yleisesti tehty kompromissi liittyy tapaan, jolla malleja sovelletaan. Simulaattoreihin liitetyt osamallit antavat tavallisesti tuloksenaan vain ennusteen (mallin odotusarvo) ilman informaatiota ennusteeseen liittyvästä epävarmuudesta (mallivirheestä). Tällainen mallien deterministinen soveltaminen on vielä tällä hetkellä vallitseva tapa käyttää malleja metsikkösimulaattoreissa. Simulointilaskennan eri vaiheisiin liittyy myös muita virhelähteitä, joista on syytä olla tietoinen kun ar-



Kuva 1. Laskennan eri vaiheisiin sisältyvät virhelähteet Motti-metsikkösimulaattorissa.

vioidaan simulointitulosten soveltuvuutta ja käyttökelpoisuutta erilaisten käytännön ongelmien ratkaisuun. Esimerkkinä metsikön kehityksen simulointiin sisältyvistä mahdollisista virhelähteistä tarkastellaan seuraavassa Metsäntutkimuslaitoksen Motti-metsikkösimulaattorin (Salminen ym. 2005, Hynynen ym. 2002) laskennan eri vaiheita (kuva 1).

Motti-ohjelmistossa, kuten monessa muussakin simulaattorissa, laskennan lähtötietona käytetään maastossa mitattua metsikkötietoa. Se sisältää osin mitattua ja osin silmämääräisesti arvioitua tietoa kasvupaikasta, puuston määrästä ja rakenteesta. Käytännön laskentasovelluksissa lähtötietona käytetään tavallisesti kuvioittaisella arvioinnilla kerättyä mittaustietoa. Ensimmäinen simuloinnin virhelähde onkin maastomittausten virheet. Niillä voi olla hyvinkin merkittävä vaikutus koko laskentatuloksen luotettavuuteen. Mittausvirheen suuruutta ja sen merkitystä simulointitulokseen ovat tarkastelleet mm Haara ja Korhonen (2004a,b) ja Ojansuu ym. (2002).

Laskennan lähtötietona käytettävä kuvioittaisen arvioinnin puustotieto on metsikkötason tietoa, joka sisältää puuston keskiarvotunnuksia (esim. keskiläpimitta, keskipituus), vallitsevaa puustoa kuvaavia tunnuksia (esim. valtapituus) ja hehtaariohtaisia summatunnuksia (esim. tilavuus, pohjapinta-ala, runkoluku). Motti-ohjelmisto perustuu puukohtaisiin malleihin, jotka edellyttävät metsikön kuvaamista puutason tunnusten avulla. Koska metsikkötason kuviotiedot eivät sisällä tietoa yksittäisistä puista, puutunnukset joudutaan ennustamaan mitattujen metsikkötunnusten avulla käyttäen kokojakaumamalleja. Ennustetuista kokojakaumista poimitaan erikokoisia kuvauspuita, joiden avulla metsikkö kuvataan. Näin ollen simuloinnin lähtötalanteena käytettävä puusto on malleilla saatu ennuste, johon sisältyy maastomittausvirheen lisäksi myös mallivirhettä.

Puuston kehitystä simuloitaessa sovelletaan useita ennustemalleja, joihin kaikkiin sisältyy mallivirhettä. Eri osamallien avulla ennustetaan puun ominai-

suuksia, puuston rakennetta ja puuston kehitysdynamiikkaa. Pitkän aikajakson simuloinnissa malleilla ennustetaan useita peräkkäisiä kasvujaksoja. Tällöin myöhemmän kasvujakson lähtötilanteena käytetään edellisen jakson ennustettua lopputilannetta. Lopulliseen simulointitulokseen sisältyy siten myös kaikkien käytettyjen osamallien virheet. Mallivirheistä osa kumoaa toisensa, osa kumuloituu, ja joidenkin mallien virheet ovat toisistaan riippuvia. Sen vuoksi metsikön simulointitulokseen ennustevirhe on hyvin monen osatekijän yhteisvaikutuksen tulos, jota on vaikea analyttisesti määrittää. Näitä mallivirheitä onkin useissa tutkimuksissa tarkasteltu (mm. Mowrer ja Frayer 1986, Gertner 1987, Kangas 1997, 1999).

Tähän saakka simulointiohjelmistoihin ei ole pystytty sisällyttämään arviota koko laskelmatuloksen luotettavuudesta, vaan simulointituloksena saadaan ennusteen odotusarvo ilman tietoa siihen liittyvästä virheestä. Vaikka simulointien ja niihin perustuvien jatkolaskelmien tulokset raportoidaankin usein näennäisen tarkkoina ennusteina, on laskentatulosten todellinen tarkkuus paljon karkeampi. Pelkkä kasvumallien vaihtaminen ei poista kaikkia simulointiin liittyviä virhelähteitä, vaan merkittävä osa virhelähteistä on riippumaton itse kasvumalleista ja niiden luotettavuudesta. Luotettavuusarvion sisällyttäminen simulointilaskelmien tuloksiin on yksi tämän hetken tärkeimpiä haasteita mallinustutkimuksessa.

### Miten haasteisiin voidaan vastata

Metsätalouden toimintaympäristön muuttuessa metsien kehitysenusteiden laadintaan kaivataan uusia menetelmiä. Tieto siitä, miten eri kasvutekijät tai metsänkäsittely ovat vaikuttaneet metsien kehitykseen ennen, ei varmaankaan voi selittää kehitystä tulevaisuuden muuttuneissa olosuhteissa. Metsien kehitykseen vaikuttavien prosessien entistä parempi tuntemus ja sen sisällyttäminen ennustemalleihin on yksi avain parempien mallien kehittämiseen.

Kasvumalleista puhuttaessa mallit jaotellaan usein empiirisiin aineistoihin pohjautuviin tilastollisiin malleihin ja kasvuprosessien kuvaukseen pohjautuviin prosessimalleihin. Vaikka mallit voidaankin karkeasti tyypitellä tämän luokituksen perusteella, ei eri lajityyppien puhtaita edustajia enää juuri

löydy kehittyneimpien mallien joukosta. Nykyiset prosessimallit sisältävät jo melko paljon empiiristen mittausten perusteella saatuja parametreja. Toisaalta tilastollisten mallien rakenteen suunnittelussa aikaisemman tiedon ja teorian merkitys on korostunut. Läheskään kaikkea tilastolliseen malliin sisältyvästä informaatiosta ei saada suoraan siitä aineistosta, johon malli sovitetaan.

Kehitettäessä uusia menetelmiä ennustaa metsien kasvua muuttuneissa olosuhteissa, kaikki tähän saakka kertynyt tieto ja kokemus tulisi hyödyntää. Arvokasta kokemusta on varmasti kertynyt niin tilastollisia kuin prosessimallejakin kehitettäessä. Se saadaan hyödynnettyä vain mallintajien yhteistyön kautta.

Jos mallien oletetaan toimivan luotettavasti tulevaisuuden muuttuneissa olosuhteissa, niiden tulisi toimia luotettavasti myös nykyisissä oloissa. Tämän luotettavuuden toteamiseksi on paljon tehtävää niin tilastollisten kuin prosessimallienkin osalta.

Mallin toimivuuden luotettavuutta on usein arvioitu vertailemalla erilaisia malleja keskenään. Mallien keskinäinen vertailu on toki mielenkiintoista, mutta usein siitä saatava todellinen informaatio jää vähäiseksi, koska yhdenkään vertailussa mukana olevan mallin todellista luotettavuutta ei tunneta. Eri mallityyppien luotettavuuden testaamisessa tulisikin nykyistä laajemmin käyttää empiirisiä mitattuja aineistoja, joita vuosikymmeniä kestäneen mittaustoiminnan tuloksena on kertynyt melkoisesti. Tällaisen mallintestauksen tavoitteena ei ole asettaa malleja paremmuusjärjestykseen, vaan saada kuva erilaisten mallien toiminnan luotettavuudesta ja tunnistaa eri mallityyppien vahvuudet ja heikkoudet. Uskon, että huolellisesti toteutettu mallien testaus loisi hyvän pohjan jatkotutkimukselle, jonka tavoitteena on kehittää tulevaisuudessakin soveltamiskelpoisia ennustejärjestelmiä.

### Kirjallisuus

- Gertner, G. 1987. Approximating precision in simulations projections: an efficient alternative to Monte-Carlo methods. *Forest Science* 33: 230–239.
- Haara, A. & Korhonen, K.T. 2004a. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.

- & Korhonen, K.T. 2004b. Toimenpide-ehdotusten simulointi laskennallisesti ajantasaistetusta kuvioaineistosta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2004: 157–173.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Salminen, H., Siipilehto, J. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835. 116 s..
- Kangas, A.S. 1997. On the prediction bias and variance in long-term growth projections. *Forest Ecology and Management*. 96: 207–216.
- 1999. Methods for assessing uncertainty of growth and yield predictions. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1357–1364.
- Mowrer, H.T. & Frayer, W.E. 1986. Variance propagation in growth and yield projections. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1196–1200.
- Ojansuu, R., Halinen, M. & Härkönen, K. 2002. Metsätalouden suunnittelujärjestelmän virhelähteet männyn ensiharvennuskypsyden määrittämisessä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 441–457.
- Salminen, H., Lehtonen, M. & Hynynen, J. 2005. Reusing legacy FORTRAN in the MOTTI growth and yield simulator. *Computers and Electronics in Agriculture* 49(1): 103–113.

## 9 viitettä

- MMT Jari Hynynen, erikoistutkija, Metsäntutkimuslaitos.  
Sähköposti [jari.hynynen@metla.fi](mailto:jari.hynynen@metla.fi)