

Annikki Mäkelä

Mallien käytöstä metsän kasvun ennustamiseen ja käsittelyjen suunnitteluun

Metsätieteen aikakauskirjan (MTA) viime numeroissa on arvioitu eräitä elintoimintoihin perustuvien mallien avulla tehtyjä käytännön metsänhoitoon liittyviä johtopäätöksiä (Smolander MTA 3/2006, Ojansuu MTA 4/2006, Harstela MTA 4/2006). Erityisesti Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksella kehitettyä elintoimintoihin perustuvaa PipeQual-mallia (Mäkelä 2000, Mäkelä ja Mäkinen 2003) on kuitenkin käytetty männiköitä koskeissa taloudellisissa laskelmissa, joita on tehty uusien hyvän metsänhoidon suositusten pohjaksi (Tapio 2006). Ovatko saadut tulokset siis täysin epäluotettavia tai jopa virheellisiä? Tarkastelen seuraavassa yleisesti erilaisten dynaamisten mallien käyttöä ja luotettavuutta metsän kasvun ennustamisessa.

Mallien luokituksia

Dynaamiset mallit

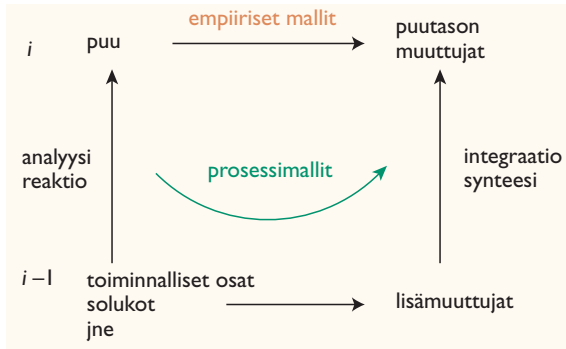
Dynaamisen systeemin peruskäsitteitä ovat tilat ja niiden muutosnopeudet. Tilat ovat varastoja, joiden muutos on dynaamista, niin että seuraavan aikajakson tilan arvo riippuu paitsi ympäristöstä, myös edellisen jakson tilasta. Esimerkiksi metsän runkotilavuuden kehitys voidaan laskea dynaamisesti lähtien alkutilasta ja laskien joka ajanhetkelle ennustettu uusi tila ja edelleen sen ennustettu uusi muutos.

Tilastolliset mallit

Staattiset tilastolliset mallit kuvaavat riippuvien ja riippumattomien muuttujien välistä kokeellista yhteyttä. Malli voi koostua yhdestä tai useista samanaikaisista yhtälöistä, ja aineistoyksiköiden välisiä riippuvuusrakenteita voidaan sisällyttää virhetermeihin ja siten ottaa huomioon parametrien estimoinnissa. Tilastolliset mallit voivat olla myös dynaamisia. Mallien laadinnan pääkriteerinä on, että ennusteet ovat mahdollisimman samankaltaisia mittausten kanssa käsillä olevassa aineistossa. Tilastollisten mallien testaus edellyttää ennusteiden laskentaa uudessa, periaatteessa samanlaisessa ns. validointiaineistossa. Tilastollisia malleja ei voi soveltaa tilanteisiin, jotka olennaisesti poikkeavat laadinta-aineistosta.

Prosessimallit

Prosessimalli eli mekanistinen malli on dynaaminen malli, joka tarkastelee ilmiötä osailmiöiden ja niiden välisten kytkentöjen kautta (kuva 1). Prosessimallin rakenne perustuu ajatukseen ilmiöiden monitasaisuudesta eli hierarkiasta. Puustoon liittyviä erilaisia ilmiöitä voidaan esimerkiksi tarkastella metsälön, metsikön, puiden, lehtien ja juurten, solukoiden tai molekyylien tasolla. Prosessimallin perusajatuksena on, että ilmiön erittely sitä selittävällä seuraavaksi tarkemmalla hierarkiatasolla auttaa ymmärtämään



Kuva 1. Prosessimallin ja empiirisen mallin rakenne hierarkiatasolla i ja $i-1$ Thornley'a ja Johnsonia (2000) mukailleen..

ilmiön syy-seuraussuhteita ja sitä kautta paremmin ennustamaan ilmiötä. Systeemin rakenteen ja dynamiikan kuvaus siis sisältää jo paljon tietoa kuvattavasta ilmiöstä. Osaprosessien mallit laaditaan ja/tai parametrisoidaan käyttäen normaaleja kokeellisen tutkimuksen menetelmiä ja tilastollisia estimointimenetelmiä. Mallissa siis ilmiö jaetaan osiinsa, joita tutkitaan kokeellisesti, ja mallin avulla osista johdetaan tuloksia sille tasolle, jota mallin avulla haluttiin alunperin kuvata. Näitä tuloksia kutsutaan joskus mallin *emergenteiksi* ominaisuuksiksi: ne ovat systeemin ominaisuuksia, jotka seuraavat osaprosesseja ja niiden kytkentöjä koskevista oletuksista ja joita ei välttämättä olisi oivallettu ilman mallia.

Prosessimallin laadinnan pääkriteerinä on, että malli kuvaa systeemin dynamiikan ja vasteet erilaisille ulkoisille syötteille (esim. sää, metsän käsittelyt) periaatteellisesti järkevällä tavalla ja vastaten parasta tietämystämme asiasta. Tämä tietämys ei välttämättä ole välittömästi peräisin mittauksista, vaan se voi olla luonteeltaan laadullista, esimerkiksi kokemustietoa tai tietoa eri prosessien välisistä vuorovaikutuksista. Prosessimallin testaukseen kuuluu siten olennaisesti mallin logiikan testaaminen; tutkitaan, tuottaako malli laadullisesti järkeviä eli biologisen tiedon kanssa yhteensopivia tuloksia eri olosuhteissa. Tämä ei ole itsestään selvää, vaikka osaprosessit sinänsä olisi kuvattu järkevästi ja jopa tarkasti, koska osamallien yhdistämiseen kokonaisuudeksi myös liittyy oletuksia. Mallin testaus kohdistuukin erityisesti juuri osamallien kytkennän onnistumisen arviointiin. Kääntäen, mallin suurin

epävarmuus liittyy siihen, että ei tiedetä, ovatko nämä kytkennät onnistuneita, vaikka kukin osamallinänsä olisi luotettava.

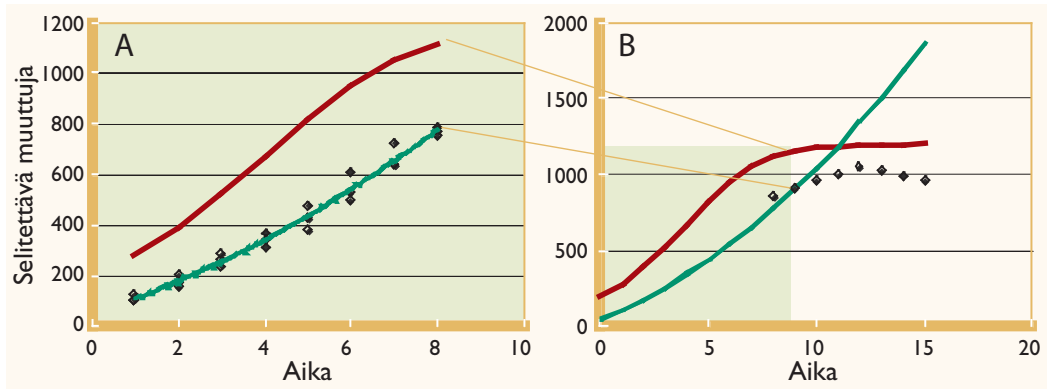
Erilaisten mallien luotettavuudesta

Tilastollisen ja prosessimallin eroa voidaan havainnollistaa tarkastelemalla kahta yksinkertaista mallia ja niiden suhdetta mittauksiin ja teoriaan (kuva 2). Oletetaan, että jostakin ilmiöstä on tehty mittauksia ja niiden perusteella sovitettu aineistoon tilastollinen malli. Malli on testattu riippumattomassa aineistossa, ja se toimii hyvin. Teorian perusteella on kuitenkin johdettu toisenlainen malli, joka kuvaa ilmiötä hiukan laajemmin, mutta sopii melko huonosti käsillä oleviin mittauksiin. Oletetaan sitten, että saadaankin uusia mittauksia alueelta, johon tilastollista mallia ei alkujaan ollut sovitettu. Teoriaan ja laadulliseen tietoon perustuva prosessimalli voi tällöin ennustaa paremmin uuden tapahtuman luonteen kuin tilastollisen mallin ekstrapolointi aineiston ulkopuolelle, vaikka se edelleenkin ei ole kvantitatiivisesti kovin tarkka.

On selvää, että kuvattua kahta mallia on vaikea vertailla yleisellä tasolla, koska niiden luonne ja tavoitteet ovat hyvin erilaiset. Tilastollinen malli sopii parhaiten tilanteeseen, jossa halutaan tarkkoja ennusteita jostakin melko hyvin tunnetusta ja otantamittauksin kartoitetusta asiasta. Prosessimalli taas tuntuisi sopivan paremmin tilanteeseen, jossa halutaan tarkastella, mitä kaiken meillä käytössä olevan tiedon perusteella tapahtuisi, jos tulisikin uusi tilanne, joka poikkeaa saatavilla olevasta otoksesta. Tällöin uutta tilannetta tarkastellaan erityisesti suhteessa nykyiseen, ja keskeistä on muutoksen suunta, ei niinkään tarkka määrällinen tieto.

Metsikköä kuvaavista malleista

Metsikön kasvu ja tuotos on monitasoinen dynaaminen prosessi, jota kuvaavat mallit ovat yleensä dynaamisia. Käytännössä kasvumallit eivät ole puhtaasti prosessipohjaisia eivätkä tilastollisia, vaan sisältävät piirteitä molemmista. Tilastollisiin malleihin on valittu funktioita, jotka sopivat yhteen teoreettisen tiedon kanssa, ja niihin on liitetty osa-



Kuva 2. Prosessimallin (punainen viiva) ja tilastollisen mallin (vihreä viiva) periaatteellinen vertailu. A) Tilastollinen malli on sovitettu aineistoon ja kuvaa sitä tarkasti alueella, josta aineisto on kerätty. Prosessimalli kuvaa trendin jokseenkin hyvin, mutta malli on harhainen. B) Kun aineistoa saadaan lisää, tässä esimerkissä osoittautuu, että tilastollista mallia ei voida ekstrapoloida aineiston ulkopuolelle. Prosessimalli sen sijaan ennustaa uudet mittaukset laadullisesti oikein, joskin harha säilyy edelleen.

malleja, jotka on ensisijaisesti perusteltu teorian, ei mittausten nojalla. Prosessimalleja taas on kalibroitu aineistojen perusteella siten, että tulokset on saatu tarkemmin vastaamaan mittauksia tai vastaavia tilastollisia malleja. Tällaisten laajojen ja monimutkaisten mallien luotettavuuden arviointi on erityisen hankalaa. Edellä kuvatut mallien laadinnan ja testausten pääkriteerit on kuitenkin hyödyllistä pitää mielessä, kun tarkastellaan eri mallien luotettavuutta ja sitä, millä tavalla eri mallien laatijat ovat luotettavuutta arvioineet.

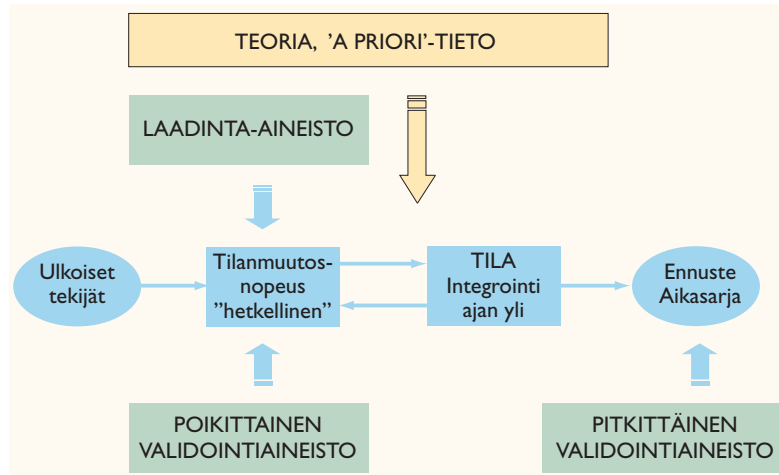
MELA:n kasvumallit

MELA:ssa käytetyt kasvumallit (Hynynen ym. 2002) perustuvat yksittäisten puiden viiden vuoden kasvun ennustamiselle. Metsikössä puut esitetään kuvauspuina, jotka edustavat tiettyä määrää saman kokoisia puita. Kuvauspuun kasvu riippuu monista tekijöistä, jotka voidaan luokitella metsikön ympäristöön (kasvupaikka, ilmasto jne.), puun omaan tilaan (pituus, läpimitta, latvusraja jne) sekä metsikön muiden puiden aiheuttamaan kilpailuvaikutukseen (metsikön ppa, puun suhteellinen korkeus jne.). Kasvumallit on laadittu siten, että nämä vaikuttavat tekijät ovat niissä selittäjinä. Kasvumallit tuottavat puun piteuden ja läpimitan viiden vuoden kasvun. Näiden perusteella ennustetaan myös muita puun

tunnuksia, kuten latvussuhde ja runkotilavuus. Lisäksi ennustetaan metsikön uusi tiheys viiden vuoden jälkeen. Siihen vaikuttaa mahdollinen metsän harvennus sekä mahdollinen itseharveneminen siten, että puiden lukumäärä hehtaarilla ei voi ylittää tiettyä keskimääräisen puun koosta riippuvaa rajaa. Itseharveneminen pakotetaan erillisen mallin avulla, jonka parametrisointi poikkeaa viiden vuoden kasvun mallien parametrisoinnista ja sisältää niitä enemmän epävarmuutta (Hynynen ym. 2002, Hynynen ja Ojansuu 2003).

Kasvumallien validointi perustuu laadittujen viiden vuoden kasvumallien testaamiseen riippumattomassa aineistossa ja niiden kalibrointiin testin perusteella. Kalibroinnin kriteerinä on, että mallien harha tulisi poistettua mahdollisimman tarkasti. Tuloksena on siis mahdollisimman harhattomat mallit jokaisen puun pohjapinta-alan viiden vuoden kasvulle, kun puun ja metsikön muiden puiden senhetkiset koot ja määrät läpimittaluokittain tunnetaan (kuva 3).

Menettely jättää mallien luotettavuudesta monia kysymyksiä. Itseharvenemisrajan mallin validointia ei (tietääkseni) ole raportoitu, joten ei ole tiedossa, miten hyvin se toimii. Mitä tapahtuu jos esimerkiksi puuston kuolleisuus ennustetaan väärin? Silloin metsikön tila viiden vuoden kuluttua on harhainen, ja se ilman muuta heijastuu myös seuraavan jakson kasvuennusteisiin, koska ne riippuvat metsikön tilasta. Tällainen harha todennäköisesti kasvaa ajan



Kuva 3. Mallin, mittausaineistojen ja teorialiedon liittyminen toisiinsa. Dynaamisen mallin laadintaan kuuluu 1) mallin rakenteen määrittely teorialiedon pohjalta ja 2) muutosnopeuksia kuvaavien osamallien identifiointi mittausten ja / tai teorialiedon pohjalta. Jokainen muutosnopeuksia kuvaava osamalli laaditaan ja testataan erikseen ns. poikittaisessa aineistossa, joka koskee dynaamisen mallin yhtä aika-askelta. Mallin ennusteet metsikön tilan kehityksestä testataan ns. pitkittäisessä aineistossa, joka koskee tilojen integrointia ajan yli.

kuluessa, ellei mallissa sitten ole takaisinkytkentöjä, jotka tasoittaisivat sen vaikutusta pitkällä aikavälillä. Kasvumalleja ei ole kalibroitu pitkittäisaineistoihin, jotka näyttäisivät, miten vaikutukset kumuloituvat pitkän ajan kuluessa. Systeemanalyysin kielellä sanottuna: malleja ei ole testattu systeemitasolla, vaan ainoastaan osamalleja on testattu riippumattomassa aineistossa.

HY:n prosessimallit

PipeQual-malli on ns. prosessimalli, jossa – samoin kuin MELA-malleissa – metsikön kasvu perustuu yksittäisten, eri kokoisten kuvauspuiden kasvuun. Puun kasvumalli on kuitenkin johdettu puun kasvuun liittyvistä prosesseista ja niitä koskevasta kokeellisesta ja teoreettisesta tiedosta, ei tilastollisista kasvufunktioista. Mallin keskeinen lähtökohta on, että kasvu perustuu fotosynteesissä yhteytettyyn hiileen ja sen jakautumiseen puun eri osien kasvuun. Malli hyödyntää fysiikasta saatua massan säilymisen lakia, joka antaa kasvulle vahvan rajoitteen: metsä ei voi käyttää hiiltä enempää kuin sen lehvästö voi yhteyttää. Hiiltä kuluu paitsi kasvuun, myös hengitykseen ja karikesatoon.

Metsikön fotosynteesin määrä ja riippuvuus ympäristöstä ja yhteyttävästä lehtipinta-alasta tunnetaan nykyisin erittäin hyvin, koska metsikön kaasunvaihtoa mitataan yhä tihenevässä verkostossa eri puolilla maailmaa. Nämä metsikkötason fotosynteesin estimaatit ovat lisäksi hyvin sopusoinnussa tarkempien fysiologisten mallien tuottamien ennusteiden kanssa (Le Maire ym. 2005, Mäkelä ym. 2006), joten ennusteita voidaan pitää hyvinkin luotettavina. Metsäekosysteemin hengityksestä on myös tehty paljon kokeellisia ja teoreettisia tutkimuksia, ja melko hyvin ymmärretään mitkä tekijät vaikuttavat hengityksen määrään (Ryan ym. 1996). Lehti- ja oksakarikkeiden määrää pystytään ennustamaan keskimääräisellä tasolla, joskaan vuosien välistä vaihtelua ei tunneta vielä riittävän hyvin (Lehtonen ym. 2004). Huonoiten tunnettu karikkekomponentti on hienojuurten kuolleisuus, josta on erilaisia vaihtelevia estimaatteja (Matamala ym. 2003).

Myös puiden luontainen kuolleisuus on melko huonosti tunnettu sekä teoreettisesti että kokeellisesti, kuten myös MELA-kasvumalleissa on laita. PipeQual-mallissa puiden kuolemistodennäköisyys lisääntyy, kun käytettävissä oleva tila ja kasvuresurssit vähenevät. Mallilla on kuitenkin se tärkeä ominaisuus, että resurssien saatavuus – käytännössä

fotosynteesi – rajoittaa metsikön mahdollista kokonaiskasvua riippumatta puiden lukumäärästä.

Jotta fotosynteesi, hengitys ja puiden väliset vuorovaikutukset voitaisiin kuvata mahdollisimman realistisesti, puun massa jaetaan lehtien, hienojuurten, oksien ja paksujen juurten massaan. Lisäksi kuvataan puun pituus, paksuus, latvusrajan korkeus ja oksien keskipituus, jotka vaikuttavat puun suhteelliseen asemaan metsikössä. Näin ollen yksi mallin keskeisistä tehtävistä on ennustaa, miten yhteytetty hiili jakautuu yhtäältä näiden eri osien kasvuun ja toisaalta erikokoisten puiden välille. PipeQual-mallissa kasvun jakautumisen perusteena käytetään puiden rakenteista kokeellisesti havaittuja säännönmukaisuuksia, joiden oletetaan säilyvän vuodesta toiseen. Kasvu siis jaetaan siten, että nämä rakenteet ovat edelleen voimassa, kun puu on kasvanut ja pudottanut karikesatonsa.

Osamalleihin liittyy paljon parametreja, joista useimmilla on jokin fyysikaalinen merkitys. Parametrit voidaan tällä perusteella mitata tai estimoida kokeellisista aineistoista siten, että eri osamallien parametrit ovat riippumattomia toisistaan. Näin saadaan mallilla tehtyä ennuste metsikön kasvusta erilaisilla alkutiloilla ja käsittelyillä. Jos mallin rakenne ja osamallien kytkennät vastaavat hyvin todellista, kuvattavaa systeemiä, ennuste on realistinen ja sovelluskelpoinen. Mallin testauksen päätavoitteena onkin selvittää, miten hyvin osamalleista johdettu kokonaistoiminta ja mahdolliset emergentit ominaisuudet vastaavat todellisen systeemin toimintaa ja vasteita esimerkiksi käsittelyille.

Dynaamisen prosessimallin testaus tapahtuu siten, että mallilla simuloidaan joidenkin metsien kehitystä, ja tuloksia verrataan mitattuihin metsiköihin. Paras testiaineisto on sellainen, jossa voidaan seurata yhden metsikön kehitystä mahdollisimman pitkän ajan kuluessa. Näin voidaan parhaiten asettaa systeemin sisäistä dynamiikkaa kuvaavat ominaisuudet koetukselle. Jos tällaisia aineistoja on useita, testauksessa voidaan vertailla mallin toimintaa eri tavoin käsiteltyjen metsiköiden simuloinnissa. Pysyvät koealat ovat hyviä testiaineistoja, mutta niissäkin on ongelmana, että esimerkiksi lehtipinta-alaa ei ole mitattu. Se on kuitenkin fotosynteesin ennustamisen kannalta keskeinen muuttuja ja täytyy siis testaus- tarten arvioida esimerkiksi tilastollisten mallien perusteella.

PipeQual-mallin eri ominaisuuksia on tähän mennessä testattu tutkimuksissa, joita voitaneen luonnehtia lähinnä tapaustutkimuksiksi. Niissä on tutkittu kiertoajan ennusteita ja eri kokoluokkien välisiä kasvu- ja kuolleisuussuhteita, toisin sanoen testit on tehty systeemitasolla. Niissä on myös käytetty vartavasten tällaisia testejä varten kehitettyjä menetelmiä (esim. Sievänen ym. 2000). Testit ovat siis olleet tiukkoja, vaikkakin ne on toistaiseksi tehty suppeissa aineistoissa. Olenaisena erona MELA-mallien testaamiseen ja kalibrointiin verrattuna on se, että testeissä on huomio kohdistettu mallin pitkän ajan toimintaan ja sen loogisuuden varmistamiseen, kun taas MELA-mallien testit ja kalibrointi ovat kohdistuneet yksittäisten puiden viiden vuoden kasvussa havaitun vaihtelun tarkkaan ennustamiseen ja alueelliseen kattavuuteen (kuva 3).

On erittäin tärkeää muistaa, että prosessimalli ei ole pelkästään laskenta-automaatti vaan pikemminkin ajattelun apuväline, jonka toimintaa voidaan ja tulee aina arvioida myös laadullisesti. Malli kertoo, mitä tarkasteltavassa systeemissä tapahtuisi, jos systeemi toimisi tehtyjen oletusten mukaan. Koska tehdyt oletukset on johdettu fysiikasta, biologiasta ja kohdistetuista kokeista, voidaan arvioida myös tulosten järkevyyttä, ei ainoastaan numeerista tarkkuutta, ja johtopäätökset voidaan näin suhteuttaa oletuksiin. Esimerkiksi PipeQual-mallissa on takaisinkytkentöjä ja rajoituksia, jotka takaavat sen, että metsikön kehitys ei voi ”karata” minnekään, vaan se pysyy järkevissä rajoissa, vaikka olosuhteet muuttuisivat ennakoimattomasti.

Yhteenveto: mallien tila ja soveltuvuus

Tällä hetkellä Metlassa kehitetyt tilastolliset kasvumallit (esim. Hynynen ym. 2002) ovat luotettavimpia silloin, kun halutaan ennustaa jonkin satunnaisen metsikön lähiajan (5–20 vuoden) kasvua. Mallit ovat silloin käyttökelpoisia kaikille metsätaloudellisesti merkittävälle suomalaisille puulajeille ja niitä voidaan soveltaa maan kaikissa osissa. Luotettavuus kuitenkin alenee, jos tarkasteltava aika pitenee, koska parametrien estimointivirhe ja mallivirhe kasautuvat ja olosuhteiden muuttumisen mahdollisuus lisääntyy. Varsinkin silloin, kun alkutilana on nuori metsikkö, jonka kasvuun liittyy paljon epävarmuut-

ta ja luontainen kuolleisuus on mahdollista, pitkän ajan ennusteet voivat olla epävarmoja. Malleja ei myöskään tulisi käyttää kuvaamaan sellaisia metsän käsittelyjä tai ympäristöolosuhteita, joita ei ole mallien laadinta-aineistossa.

HY:n prosessimallit soveltuvat tällä hetkellä tilastollisia malleja huomattavasti paremmin jonkin tietyn metsikön lähiajan kasvun tarkkaan ennustamiseen. Tämä johtuu ensinnäkin siitä, että malleja ei ole viety alueelliseen mallisysteemiin, jossa ajavia muuttujia voitaisiin ennustaa paikkakohtaisesti. Toiseksi malleja ei liioin ole kalibroitu tällaisia aineistoja vasten.

Jos taas halutaan tietoa metsikön kehityksestä kiertoaikana, esimerkiksi miten erilaiset kasvatustiheddet ja harvennukset vaikuttavat yhtäältä kasvuun ja toisaalta puutavaran laatuun, niin prosessimallilla voidaan hyvinkin vertailla ja jopa optimoida erilaisia menetelmiä. Vaikka tulokset eivät antaisi yksittäistapauksissa tarkkoja vastauksia, mallia voi kuitenkin käyttää eri vaihtoehtojen vertailuun ja niiden välisten erojen hahmottamiseen. Tällaisissa vertailuissa HY:n prosessimallit ovat toimineet samalla tavalla ja tuottaneet samoja johtopäätöksiä kuin Metlan tilastolliset mallit (esim. Mäkelä ym. 2000).

Entä sitten jos mennään niin sanotusti ”aineiston ulkopuolelle”? Näin on tapahtunut esimerkiksi keskustelua herättäneessä taloudellisessa optimoinnissa, kun metsikön optimaaliset käsittelyt ovat löytyneet alueelta, josta ei ole kattavaa kokeellista tietoa (Hyytiäinen ym. 2004). Tällöin tilastollisen mallin antama optimiratkaisu saattaa löytyä ”sallitun alueen” rajalta, jolloin se ei välttämättä ole kovin luotettava eikä liioin edes varsinainen optimi, koska rajoite ei johdu itse ilmiöstä vaan laskennan luotettavuudesta. Prosessimallille tällaisia rajoitteita ei tarvitse asettaa, koska mallin luotettavuus ei riipu siitä, onko kyseisestä tapauksesta olemassa kattavia mittauksia. Jos malli toimii järkevästi, se voi osoittaa järkeviä ratkaisuja myös alueelta, joka tilastollisen mallin näkökulmasta on ”aineiston ulkopuolella”.

Edellä sanottu ei tietenkään tarkoita, että tulokset olisi ilman muuta hyväksyttävä myös silloin, kun ne kertovat tilanteista, joista on vähän kokeellista tietoa. Päinvastoin, tuloksiin on silloin suhtauduttava erittäin kriittisesti. Niiden luotettavuutta on arvioitava suhteuttamalla mallin oletuksia ja tuloksia kaikkeen muuhun metsänhoidolliseen, biologiseen ja fysikaaliseen tietämykseen, jota asiasta on saata-

villa. Johtopäätökset tehdään silloin paitsi laskennan tulosten, myös kaiken muun mahdollisen tiedon perusteella. Lisäksi voidaan suunnata jatkotutkimusta selvittämään niitä kohtia, jotka tulosten analyysissä on havaittu kaikkein kriittisimmiksi tulosten luotettavuuden kannalta.

Tällä tavalla pyrittiin toimimaan silloin, kun Pipe-qual-mallia käytettiin metsiköiden kasvatuksen taloudelliseen optimointiin. Kun kannattavimmaksi ratkaisuksi saatiin yläharvennus ja kasvatus tavallista harvemmassa asennossa kiertoajan loppupuolella, tuloksen järkevyyttä verrattiin aiempiin mittauksiin, laskelmiin ja teorioihin. Todettiin, että tulos oli sopusoinnussa Vuokilan (1980) yläharvennuksesta esittämien ajatusten kanssa, jotka perustuivat hänen Metlassa johtamiinsa kokeisiin (Mielikäinen ja Valkonen 1991), eikä se riippunut olennaisesti käytetystä kasvumallista (Hyytiäinen ym. 2005). Siitä huolimatta suunniteltiin ja käynnistettiin uusia kokeita puiden fysiologisista reaktioista varjosta vapauttamiseen. Mallin puutteet kartoitettiin (Miina 2006) ja pyrittiin ottamaan ne huomioon tulosten tulokinnassa ja johtopäätöksissä. Esimerkiksi se, että laskelmissa ei ollut otettu huomioon metsikön mahdollista altistumista tuulituhoille yläharvennuksen jälkeen, pyrittiin ottamaan huomioon asettamalla sallitulle harvennuksen jälkeiselle tiheydelle minimiraja (Olli Tahvonen, suullinen tiedonanto).

Keskeistä on se, että mallien jatkokehittelyssä prosessimallia voidaan kehittää aiemmin kertyneen tiedon pohjalta liittämällä siihen uusia ominaisuuksia, jotka tekevät siitä yleisemmän ja luotettavamman. Vaikka samalla tietenkin pyritään myös testaamaan mallin luotettavuutta ns. systeemitason mittauksia vasten, tällainen testaus ei viime kädessä kuitenkaan voi olla välttämätön edellytys mallin soveltamiselle. Jos näin olisi, voisimme yhtä hyvin laittaa kädet ristiin ja odottaa, kunnes näemme millä tavalla muuttuva ilmasto muuttaa metsiämme kehitystä.

Tulevaisuuden haasteet

Jotta prosessimallien kehittämisessä kertynyt tietämys saataisiin yleiseen käyttöön suomalaisessa metsätaloudessa, prosessimallit tulisi vähitellen liittää Metlan alueellisiin mallijärjestelmiin. Tavoitteena tulisi olla hybridimalli, jonka luotettavuus perustuu

sekä aineistopohjaiseen tarkkuuteen että prosessien ymmärtämisestä seuraavaan luotettavuuteen. Tätä kohti päästään, jos 1) tilastollisten mallien prosessi-irteitä testataan aiempaa enemmän myös pitkitäisaineistoissa, ja jos 2) prosessimalleja kalibroidaan ja kehitetään ottaen huomioon alueellinen kattavuus ja metsikkökohtainen tarkkuus. Kehitystyössä tulisi yhdistää Metlan kokemus ja asiantuntemus mallien tilastollisesta testauksesta ja Suomen metsien tilasta, sekä Helsingin ja Joensuun yliopistojen kokemus elintoimintoihin perustuvien mallien kehittämisestä ja siihen liittyvistä ekofysiologisista mittauksista.

Viitteet

- Harstela, P. 2006. Teknologiaa vai taloutta? *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2006: 527–529.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA system. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 835.
- Hynynen, J. & Ojansuu, R. 2003. Impact of plot size on individual-tree competition measures for growth and yield simulators. *Canadian Journal of Forest Research* 33(3): 455–465.
- Hyytiäinen, K., Hari, P., Kokkila, T., Mäkelä, A., Tahvonen, O. & Taipale, J. 2004. Connecting a process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2060–2073.
- , Tahvonen, O. & Valsta, L. 2005. Optimum juvenile density, harvesting and stand structure in even-aged Scots pine stands. *Forest Science* 51(2): 120–133.
- Lehtonen, A., Sievänen, R., Mäkelä, A., Mäkipää, R., Korhonen, K.T. & Hokkanen, T. 2004. Potential litterfall of Scots pine branches in southern Finland. *Ecological Modelling* 180: 305–315.
- Le Maire, G., Davi, H., Soudani, K., Francois, C., Le Dantec, V. & Dufrêne, E. 2005. Modeling annual production and carbon fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories. Satellite data and field measurements. *Tree Physiology* 25: 859–872.
- Matamala, R., Gonzalez-Meler, M.A., Jastrow, J.D., ym. 2003. Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. *Science* 302(5649): 1385–1387.
- Mielikäinen, K. & Valkonen, S. 1991. Harvennustavan vaikutus varttuneen metsikön tuotokseen ja tuottoihin Etelä-Suomessa. *Folia Forestalia* 776.
- Miina, J. 2006. Kasvu- ja tuotosmallien ongelmakohdat taloudellisen tutkimuksen näkökulmasta. Teoksessa: Jalonen, R. ym. (toim.). *Uusi metsäkirja*. s. 132–133. Gaudeamus.
- Mäkelä, A. 2002. Derivation of stem taper from the pipe theory in a carbon balance framework. *Tree Physiology* 22: 891–905.
- & Mäkinen, H. 2003. Generating 3D sawlogs with a process-based growth model. *Forest Ecology and Management* 184: 337–354.
- , Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. & Mielikäinen, K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 794.
- , Kolari, P., Karimäki, J., Nikinmaa, E., Perämäki, M. & Hari, P. 2006. Modelling five years of weather-driven variation of GPP in a boreal forest. *Agriculture and Forest Meteorology* 139: 382–398.
- Ojansuu, R. 2006. Prosessimallien soveltuvuus puuston käsittelyvaihtoehtojen taloudelliseen optimointiin – Huomioita esitetyistä argumenteista. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2006: 525–527.
- Ryan, M.G., Hubbard, R.M., Pongracic, S., Raison, R.J. & McMurtrie, R.E. 1996. Foliage, fine-root, woody-tissue and stand respiration in *Pinus radiata* in relation to nutrient content. *Tree Physiology* 16: 33–343.
- Sievänen, R., Lindner, M., Mäkelä, A. & Lasch, P. 2000. Volume growth and survival graphs: a method for evaluating process-based forest growth models. *Tree Physiology* 20: 357–366.
- Smolander, H. 2006. Tutkimustulosten uutisointi ja tutkimuksen uskottavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006: 421–423.
- Tapio 2006. Hyvän metsänhoidon suositukset. *Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio*.
- Thornley, J.H.M. & Johnson, I.R. 2000. Plant and crop modelling. A mathematical approach to plant and crop physiology. The Blackburn Press. 669 p.
- Vuokila, Y. 1980. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. WSOY.

20 viitettä

■ Prof. Annikki Mäkelä, Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos. Sähköposti annikki.makela@helsinki.fi