

Annikki Mäkelä

Biologinen systeemanalyysi metsänhoidon suunnittelussa

Muuttuvan ympäristön haasteet metsänhoitotieteelle

Metsänhoidolla tarkoitetaan kaikkia metsien kasvua ja kehitystä ohjaavia toimenpiteitä, jotka edistävät asetettujen taloudellisten tai muiden tavoitteiden toteutumista. Metsänhoitotiede taas pyrkii selvittämään, mitkä menetelmät toteuttavat asetettuja tavoitteita parhaalla mahdollisella tavalla, sekä tarvittaessa kehittämään uusia menetelmiä. Metsänhoitotoimien suunnittelu voidaan nähdä optimointitehtävänä, jossa metsänhoitomenetelmät valitaan maksimoimalla tavoitteiden mukaiset tuotokset, kun rajoitteena on metsikön kasvun biologia ja muita, esimerkiksi kasvupaikan asettamia vaatimuksia.

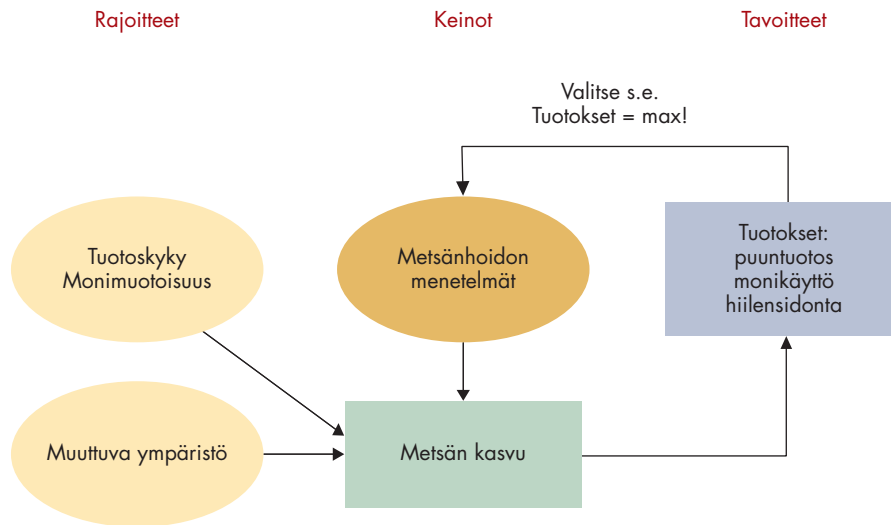
Metsänhoitotieteen emeritusprofessori Matti Leikola on kuvannut metsänhoidon tavoitteiden kehittymistä 1800-luvulta tähän päivään neliportaisena tarvehierarkiana (esim. Leikola 1996). Ensimmäinen tavoite oli kasvupaikan tuotoskyvyn säilyttäminen ennallaan, siis tietyllä tavalla kestävä kehitys. Toiseksi, 1900-luvun teollistuvassa Suomessa varsin keskeiseksi, tavoitteeksi nousi puuntuotannon lisääminen. Vuosisadan loppupuolella, aineellisen vakauden ja vaurauden lisääntyessä, alettiin puhua metsien monikäytöstä, jolloin puuntuotannon ohella tärkeinä pidettiin myös esimerkiksi marjastusta ja sienestystä. Samalla keskeisiksi tulivat myös yleisemminkin ihmisen viihtyvyyteen liittyvät tekijät, kuten metsien virkistys- ja maisema-arvot. 2000-

luvulle tultaessa yhä tärkeämmäksi tavoitteeksi on noussut luonnon suojeleminen sekä ihmisen näkökulmasta että myös itseisarvoisesti.

Tällä hetkellä luontoarvot vaikuttavat entistä keskeisemmin hyvän metsänhoidon tavoitteisiin. Maailmanlaajuisen ympäristömuutoksen luomat uhat ovat johtaneet siihen, että metsänhoidon tavoitteita ohjataan nyt myös kansainvälisillä sopimuksilla. Kestävän metsänhoidon periaatetta on EU:n ministerikokouksen sopimuksin tarkennettu ja laajennettu tuotoskyvyn säilyttämisestä siten, että siihen nyt kuuluu myös metsien lajiston monimuotoisuuden vaaliminen sekä lisäksi metsien yhteiskunnallisen kestävyuden ymmärtäminen puuntuotantotehtävää laajemmin. Samaan aikaan ympäristön muutos vaikuttaa kaikkiin metsäekosysteemin osiin, mutta on muistettava, että metsät voivat toimia myös pusku-reina ilmastonmuutosta vastaan sitomalla itseensä lisää hiiltä.

Voimme nyt tarkentaa metsänhoidon optimointitehtävää asettamalla rajoitteisiin vaatimukset tuotoskyvyn ja lajiston monimuotoisuuden säilyttämisestä sekä täydentämällä tavoitteita metsien monikäytöllä ja hiilensidonnalla (kuva 1). Jotta tehtävä voitaisiin ratkaista, on ensinnäkin pystyttävä jollain tavalla vertaamaan toisiinsa yhteismitattomia tavoitteita, ja toiseksi metsien kasvun biologiaa on ymmärrettävä niin hyvin, että pystytään ennustamaan metsän kehitystä ja mahdollisten toimenpiteiden vaikutuksia siihen myös muuttuvassa ympäristössä.

On selvää että uudessa, luonnonympäristöltään



Kuva 1. Metsänhoidon suunnittelun optimointitehtävä.

ja yhteiskunnallisilta tavoitteiltaan nopeasti muuttuneessa toimintaympäristössä ns. ”hyvän metsänhoidon” käsite on entistä paljon moniulotteisempi ja vaikeammin määriteltävissä. Enää ei edes välttämättä ole olemassa yksiselitteistä ”hyvää metsänhoitoa”, vaan sopivat menetelmät voivat riippua kunkin toimijan omista arvoista ja tavoitteista. Kun metsänhoidon suunnittelu on tähän asti lähtenyt siitä, että voidaan määritellä kaikille yhteiset hyvän metsänhoidon suuntaviivat, niin tulevaisuudessa eri toimijat saattavatkin suosia erilaisia metsänhoitomenetelmiä kukin omien tavoitteidensa saavuttamiseksi. Kaikille on kuitenkin yhteistä se, että tarvitaan entistä syvällisempää tietoa metsäekosysteemin eri osien toiminnasta ja niiden vasteista ympäristötekijöihin ja metsänhoitotoimiin, jotta parhaat toimenpideketjut voitaisiin hahmotella.

Metsänhoitotieteen tehtävänä on perinteisesti ollut tällaisen tiedon hankkiminen ja saattaminen sovellettavaksi. Metsänhoitotiede on laaja-alaista, ongelmalähtöistä tiedettä, joka ammentaa tietoperustansa biologiasta, fysiikasta ja kemiasta käyttäen myös tarvittavia menetelmätieteitä, kuten tilastomatematiikkaa. Kytkenä perustieteiden, metsänhoitomenetelmien ja metsien kasvun ja kehityksen ennustamisen välillä on kuitenkin perinteisesti ollut pitkälti laadullista, pitkäaikaiseen kokemukseen ja kuvai-

leviin teorioihin perustuvaa. Kvantitatiivista otetta tarvittaessa metsänhoitotiede on siksi monesti jäänyt taka-alalle metsäteknologiaan ja metsäsuunnitteluun verrattuna. Esimerkiksi kun on otettu käyttöön uusia käytännöllisiä metsänkäsittelymenetelmiä, kuten viime aikoina tutkittua reikäperkausta tai monitoimikoneiden toimintatapoja, niin tutkimuksen ovat tehneet pääasiassa metsäteknologit. Kasvatusketjujen suunnittelu taas perustuu melkein yksinomaan metsänarvioinnin piirissä kehitettyjen kvantitatiivisten kasvu- ja tuotusmallien soveltamiseen. Käytännössä siis metsänhoidon menetelmien kehittämisen ja kasvatusketjun suunnittelun päävastuu on etäännyntynyt varsinaisesta metsänhoitotieteestä. Voidaan perustellusti väittää, että suunnittelu on samalla myös etäännyntynyt biologisesta perustastaan, koska esimerkiksi yleisesti käytössä olevat kasvumallit on tehty pääasiassa kokeellisten aineistojen tilastollisen analyysin perusteella ilman ilmiöiden biologisten syy-seuraussuhteiden syvällistä erittelyä.

Biologiaan perustuvalla tiedolla olisi kuitenkin juuri erikoisen paljon käyttöä, kun sekä luonnonympäristö että metsänhoidon toimintaympäristö ovat muuttumassa, eikä suoraan kokemukseen perustuva tieto enää välttämättä ole sovellettavissa uusissa olosuhteissa. Ongelma ei ole siinä, että biologiset ja muut perustieteet eivät tuottaisi sovellet-

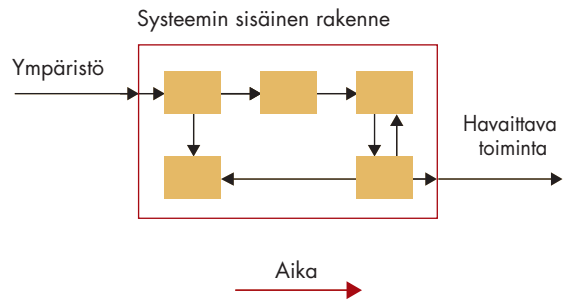
tavaa tietoa, vaan ennen kaikkea siinä, että samalla kun sovelluksissa tarvittavan tiedon ala koko ajan laajenee, perustieteet tuntuvat suuntaavan kerrallaan yhä pienempää alaa koskeviin tutkimuksiin. Metsänhoitotiede tarvitsee kokoavia menetelmiä, jotka jäsentävät ajattelua ja auttavat ymmärtämään, mikä on metsäekosysteemin ja metsänhoidon kannalta olennaista perustieteiden tuloksissa. Ollakseen tehokkaita myös ennusteiden laadinnassa tällaiset menetelmät ovat välttämättä kvantitatiivisia ja matemaattisia.

Metsä dynaamisena systeeminä

Dynaamisten systeemien teoria ja systeemianalyysi on kehitetty monimutkaisten, ajassa muuttuvien järjestelmien tutkimukseen ja niiden toiminnan ennustamiseen. Systeemianalyysi soveltuu hyvin metsäekosysteemin eri ilmiöiden tutkimiseen ja juuri kokonaiskuvan hahmottamiseen. Sitä on menetelmänä sovellettu jo 1970-luvulta lähtien erityisesti metsien tuotosekologiassa, ja viime vuosina on ilmestynyt tutkimuksia myös metsänhoidon suunnittelusta biologisten systeemimallien avulla. Myös edellä kuvatun metsänhoidon optimointiongelman tarkempi määrittely ja ratkaiseminen on tyypillistä systeemianalyysia. Esitän seuraavaksi ensin biologisen systeemianalyysin yleisiä periaatteita, sitten tarkastelen joitakin esimerkkejä sen sovelluksista metsäekologiaan ja metsänhoidon suunnitteluun.

Systeemimallissa ilmiö jaetaan osailmiöihin ja niiden välisiin kytkentöihin, ja kuvataan myös järjestelmän kytkennät ympäristönsä (kuva 2). Matemaattisesti malli kuvataan usein differentiaaliyhtälöryhmänä. Sen avulla voidaan tutkia järjestelmän sisäisestä dynamiikasta seuraavaa tyypillistä käyttäytymistä sekä järjestelmän vasteita ympäristölle, esimerkiksi säätäjöille ja metsänhoitotoimille. Systeemimalli on luonteeltaan kausaalinen: se matkii todellisuuden syy-seuraussuhteita ja niistä johtuvaa, ajassa muuttuvaa toimintaa.

Tuotosekologiset systeemimallit nojaavat suurelta osalta yleisiin fysikaalisiin lakeihin ja kasvien toiminnasta tehtyihin mittauksiin. Biologiset järjestelmät eroavat kuitenkin olennaisesti fysikaalisista kahdessa kohdassa. Ensinnäkin metsäekosysteemi on luonteeltaan monitasoinen, hierarkkinen,



Kuva 2. Dynaamisen systeemin sisäinen rakenne ja kytkennät ympäristöön.

sekä ajan että paikan suhteen. Peruselintoiminnot tapahtuvat toimivassa solukossa, esimerkiksi lehdisissä, ja riippuvat paikallisen ympäristön muutoksista vain sekuntien aikaviiveellä. Näin syntyvät aineet, esimerkiksi yhteyttämistuotteet, jakautuvat koko puun elintoimintoihin ja kasvuun kasvukauden aikana. Vuosien kuluessa puut kasvavat ja muuttavat samalla toistensa ympäristöä. Muuttunut ympäristö muuttaa peruselintoimintojen nopeuksia, mutta saa aikaan myös muutoksia kasvun jakautumisessa ja edelleen siinä, miten koko puu ohjaa peruselintoimintojaan.

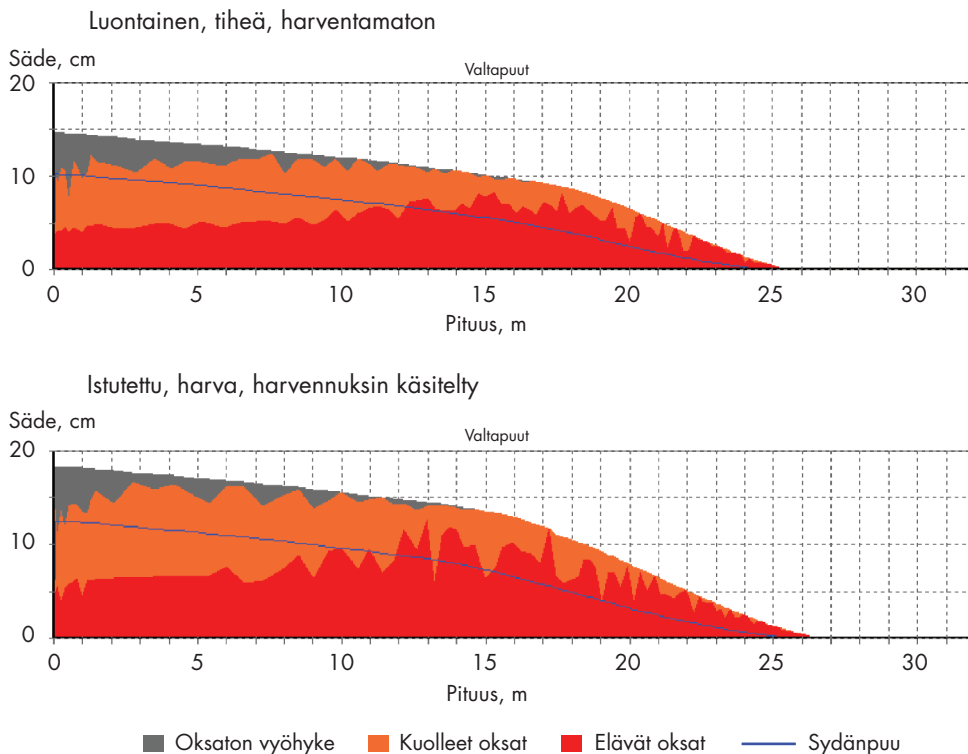
Toinen biologisten järjestelmien erityispiirre on kasvien kyky mukautua vallitseviin olosuhteisiin tavalla, joka edistää niiden henkiinjäämistä kilpailutilanteessa. Eri latvuskerrosten puut eivät esimerkiksi reagoi säteilyyn samalla tavalla, vaan varjossa kehittyneet lehdet hyödyntävät parhaiten voimakkuudeltaan pientä ja valossa kehittyneet lehdet suurta säteilyä. Myös yhteytyksessä sidottu hiili käytetään kasvuun eri tavalla riippuen kilpailuasemasta. Alisteiset, varjostetut puut panostavat suhteessa enemmän pituuskasvuun jotta selviytyisivät. Siksi ne ovat yleensä solakoita ja pienilatavaisia. Valtapuut puolestaan voivat kasvattaa suuren ja oksikkaan latvuksen, jolla sitovat entistä enemmän hiiltä ja järeytyvät nopeasti. Olennaista onkin tunnistaa, mitkä puiden ominaisuudet ovat pysyviä ja mitkä mukautuvat ympäristöolosuhteiden muutoksiin. Pysyvien ominaisuuksien tunnistaminen tapahtuu kokeellisesti mutta myös teorioihin, erityisesti evoluutioteoriaan tukeutuen.

Biologiset systeemimallit metsäntutkimuksessa

Biologiset systeemimallit kuvaavat yleensä jotakin edellä esitellyn hierarkian osa-aluetta. Ns. ekofysiologiset mallit kuvaavat lehtien tai hienojuurten aineenvaihdunnan nopeita vasteita ympäristötekijöiden muutoksiin kasvukauden aikana. Esimerkiksi yhteyttämistä kuvaavat mallit perustuvat tarkkoihin mittauksiin ympäristötekijöiden ja kaasunvaihdon kulusta versossa. Laskennallisesti toiminnot yleistetään koskemaan koko kasvustoa ja pidempiä ajanjaksoja. Tähän tarvitaan kasvuston ulkopuolelta mitattuja tietoja ympäristömuuttujista, joille lasketaan mallin avulla kasvuston sisäiset jakaumat. Näin saadaan metsikön kaasunvaihtoa koskeva ennuste, esimerkiksi päivittäisen yhteyttämistuotoksen kehitys vuoden aikana. Viime vuosina käyttöön otettujen koko metsikön hiilensidonnan mittausten menetelmien

– ns. eddy-kovarianssimittausten – avulla ennustetta on voitu testata ja on osoittautunut, että monet ekofysiologiset mallit toimivat tosiaan niin hyvin, että niiden tuloksia voidaan soveltaa laajemminkin esimerkiksi juuri metsiköiden hiilensidonnan ennusteisiin (esim. Modelling... 2005).

Puiden peruselintoimintojen vasteet ympäristölle ovat välttämätön lähtökohta, kun pyritään ymmärtämään muuttuvan ympäristön vaikutuksia metsiin. Tämä ei kuitenkaan riitä, koska vasteet voivat muokautua uuteen ympäristöön pitkän ajan kuluessa. Lopullinen vaste ei siksi välttämättä ole sama kuin lyhytaikaisten kokeiden perusteella luulisi. Pitkän ajan kuluessa voi myös tapahtua palautumattomia muutoksia metsäekosysteemin tilassa, esimerkiksi ravinnevaroissa. Yksi keskeisiä tutkimuskysymyksiä on, miten hiilensidonnan, ravinteidenoton ja vedenkäytön välinen tasapaino muuttuu pitkän ajan kuluessa erilaisissa metsäekosysteemeissä. Näihin



Kuva 3. PipeQual-mallin ennusteita valtapuiden runkomuodosta ja sisäisestä oksikkuudesta eritavoin käsitellyissä männiköissä (Mäkelä ym. 2000, kuva PuMe-simulaattori).

kysymyksiin ei ole vielä löytynyt tyydyttäviä vastauksia. Systeemanalyttiset mallit ovat kuitenkin osoittautuneet korvaamattomiksi työvälineiksi vastauksia etsittäessä. Ne auttavat hallitsemaan useita rakennetasoja ja toimintoja samanaikaisesti, mahdollistavat erilaisten oletusten vertailun ja auttavat syy-seurausketjujen erittelyssä (esim. Kirschbaum 2005). Biologisten systeemimallien tähän asti tärkein merkitys onkin ollut juuri siinä tieteellisessä tutkimuksessa, jonka perusteella nyt ymmärrämme enemmän metsäekosysteemin toiminnasta muuttuvassa ympäristössä.

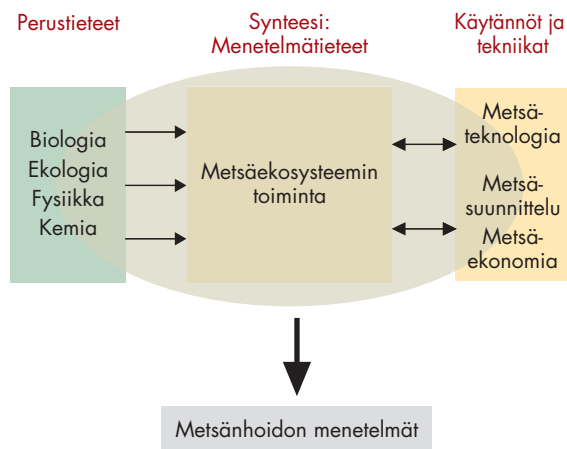
Metsänhoidon suunnittelijoita kiinnostaa erityisesti se, miten eri metsänkäsittelyketjut vaikuttavat puuston määrään, kokojakaumaan ja runkojen laatuun metsikön kiertoaikana. Kokojakauma ja laatu heijastuvat suoraan runkojen hinnoitteluun ja soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. Biologisilla systeemimalleilla on kuvattu myös näitä ilmiöitä. Tutkimusryhmässäni on kehitetty puiden elintoimintoihin perustuva malli, jonka avulla voidaan ennustaa paitsi tuotosta ja kasvua, myös puiden sisäisen oksikkuuden ja runkomuodon kehitystä erilaisissa käsittelyissä (Mäkelä ym. 2000). Malli antaa todennukaisia tuloksia siitä, miten eri käsittelyissä tuoreoksa-, kuivaoksa- ja oksattomat vyöhykkeet ovat jakautuneet runkojen sisälle (kuva 3).

Tällaisten runkolaskelmien avulla voidaan määrittää hyvinkin tarkkaan runkojen taloudellinen arvo. Siksi mallia on voitu hyödyntää metsänhoidon suunnittelussa, kun tavoitteeksi on asetettu metsänomistajan saaman taloudellisen tuloksen maksimointi. Professori Olli Tahvosen johtamassa tutkimuksessa on selvitetty, millä tavalla tässä tilanteessa männikköä tulisi harventaa ja minkälaisia kiertoaikoja käyttää (Hyytiäinen ym. 2004). Tutkimus etsi parasta ratkaisua kaikkien ajateltavissa olevien harvennustapojen joukosta. Koska aiempia mittaustietoja eri kokoisten puiden kasvusta eri tavoin harvennetuissa metsissä on olemassa vain pienestä joukosta harvennustapoja, tutkimus joutui välttämättä oletamaan, että malli soveltuu myös tapauksiin, joista ei ole aikaisempia kokeellisia havaintoja. Parhaaksi ratkaisuksi osoittautui epätavallinen harvennusohjelma, josta ei ole juurikaan aiempaa kokemusta. Tutkimus sai tästä syystä osakseen melko paljon kritiikkiä. On tietysti selvää, että tuloksia on kokeellisesti arvioitava, ennen kuin niitä voidaan siirtää käytännön

toimintaan. Esimerkki osoittaa kuitenkin selvästi, että metsänhoidon suunnittelussa olisi suurta hyötyä välineistä, jotka perustuvat yleiseen tietoon ilmiöistä ja niiden dynamiikasta, eivät pelkästään rajallisiin kokeellisiin havaintoihin.

Menetelmäosaaminen sillaksi perustieteiden ja käytännön välille

Olen edellä pyrkinyt perustelemaan väitettä, että metsänhoitotieteen tulee perustua paitsi syvälliseen perustiedepohjaan, myös relevantteihin metoditieteisiin, jotta se pystyisi vastaamaan peruskysymyksiinsä eli siihen, miten metsiä tulisi hoitaa nyt ja tulevaisuudessa, kun sekä luonnonympäristö että yhteiskunnan asettamat tavoitteet metsänhoidolle muuttuvat (kuva 4). Menetelmällisten valmiuksien tulisi auttaa kokoamaan perustieteiden yhä enemmän pirstoutuvia yksityiskohtia – näkemään metsän puilta. Koska metsä on monitasoinen, dynaaminen, itsesäätelvä järjestelmä, sen ilmiöitä voidaan hyvin jäsentää juuri systeemanalyysin avulla. Tämä tarve on jo pitkään nähty metsäekologian laitoksen opetuksessa, jossa dynaamisia malleja käytetään paljon kaikilla tutkimus- ja opetusaloilla. Uudessa kaksiportaisessa tutkinnossa matematiikan ja systeemianalyysin perusopinnot kuuluvatkin kaikkien



Kuva 4. Visio metsänhoitotieteestä sillana perustieteiden ja sovellusten välillä.

metsäekologian opiskelijoiden ohjelmaan, ja valinnaisia syventäviä opintoja on tarjolla eri kurssien yhteydessä. Tulevaisuudessa juuri tällaiset monipuoliset menetelmälliset työkalut auttavat metsänhoitotiedettä säilyttämään paikkansa todellisena siltana perustieteiden ja käytännön sovellusten välillä.

Viitteet

- Hyttiäinen, K., Hari, P., Kokkila, T., Mäkelä, A., Tahvonon O. & Taipale, J. 2004. Connecting a process-based forest growth model to stand-level economic optimization. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2060–2073.
- Kirschbaum, M.U.F. 2005. A modeling analysis of the interaction between forest age and forest responsiveness to increasing CO₂ concentrations. *Tree Physiology* 25(7): 953–963.
- Leikola, M. 1996. Mitä on hyvä metsänhoito? *Folia Forestalia* 1996(1): 57–62.
- Modelling forest production: scientific tools, data needs and sources, validation and application. 2005. Toim. Annikki Mäkelä & Hubert Hasenauer. *Tree Physiology* 25(7). 200 s.
- Mäkelä, A., Mäkinen, H., Vanninen, P., Hynynen, J., Kantola, A. & Mielikäinen, K. 2000. Männiköiden tuotoksen ja laadun ennustaminen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 794. 89 s.

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