

Annikki Mäkelä

## Puun laadun kehittymisen ennustaminen elintoimintoihin perustuvilla malleilla

Viime vuosina rungon sisäisen laadun tutkimusedellytykset ovat parantuneet ratkaisevasti mitaus- ja laskentatekniikan kehittyessä. Optisen analyysin ja röntgenkuvien avulla on mitattu runkojen rakennetta ja laadittu tarkkoja kolmiulotteisia virtuaalisia tukkeja, joita tietokoneen sahausohjelma pilkkoo tuotteiksi, ja monien sahausten jälkeen optimointiproseduurit suunnittelevat saheiden asetukset parhaalla mahdollisella tavalla (Björklund 1996). Nämä ohjelmistot ja analyysit perustuvat kuitenkin pitkälti siihen, että virtuaaliseen sahauskseen on käytettävissä valmis runko. Se, miten runko kasvoi ja hankki juuri sille ominaisen rakenteen, tai kääntäen, miten metsänhoitotoimet ohjaavat taimesta lähtevän puun rungon sisäisen rakenteen kehitystä, on edelleen vaikeammin ratkaistava ongelma kuin ole-massaolevan rakenteen sahausken optimointi.

Ongelmaa on lähestytty monella eri tavalla. Esimerkiksi Uudessa Seelannissa kerätään koko maan kattavaa tietopankkia, josta voidaan ottaa tarkasteluun kunkin alueen ja kasvupaikkatyypin tyypillisiä runkoja (Tian ja Cown 1996), ja Ranskassa on

kehitetään empiirisesti ohjelmistoa, jonka avulla puun ulkoisista tunnuksista ”ennustetaan” puun kasvuhistoria ja siten rungon sisärakenne (Houllier ym. 1995). Nämä lähestymistavat ovat kuitenkin sidottuja tyypillisiin metsän käsittelytoimiin; poikkeavissa tapauksissa rungon rakennetta on vaikea ennustaa. Yksi vaihtoehto, jonka avulla tältä ongelmalta voitaisiin välttyä, on puiden elintoimintoihin perustuvat kasvumallit. Niiden laatusovelluksia on viime vuosikymmeneltä alkaen kehitelty Suomessa (Kellomäki ym. 1992).

Se, että elintoimintoihin perustuvia malleja voidaan soveltaa sahatavaran laadun tarkasteluun, perustuu puun rakenteen kuvaukseen näissä malleissa. Sahatavaran laadun kannalta keskeisiä tekijöitä ovat puun oksikkuus, runkomuoto ja vuosilustojen jakauma, joka on yhteydessä mm. puuaineen tiheyteen. Vaikka mallien tavoitteena ei alkujaan ole ollut tällaisten tekijöiden kuvaus, monet niistä ovat kehittyneet entistä eriytyneemmän rakenteen kuvauksen suuntaan, niin että laatusovellus on tullut mahdolliseksi. Kun laadun kuvauksessa lähdetään

rakenneominaisuuksista, päästään samalla malleihin, jotka ovat riippumattomia kulloinkin käytetyistä laatuluokituksista.

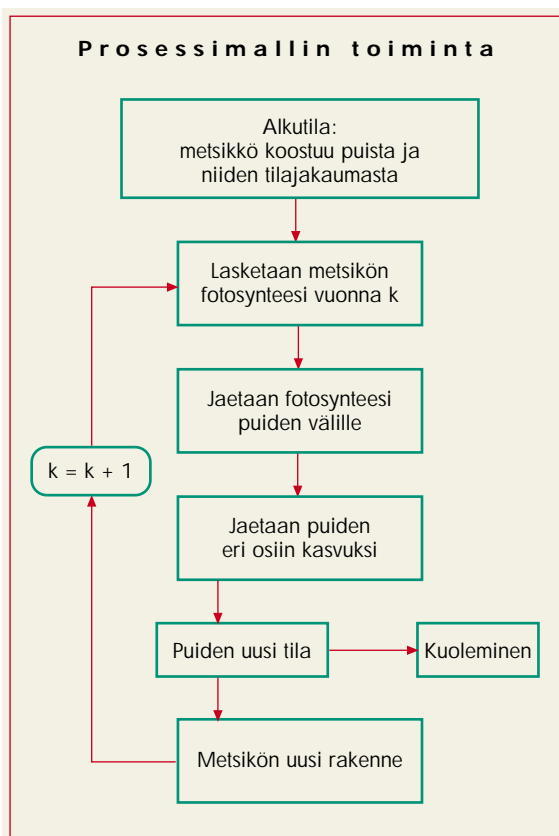
### Puiden elintoimintoihin perustuvat mallit

Elintoimintoihin perustuvat kasvumallit kuvaavat metsikön kehitystä lähtien yhteyttämisestä ja yhteyttämistuotteiden jakautumisesta puiden rakenteisiin. Metsikön vuotuinen yhteyttämistuotos lasketaan malleilla, jotka ottavat huomioon säätekijät ja sen, että puut varjostavat toisiaan. Kun yhteytety hiili jaetaan puiden kasvuksi, saadaan puiden ja metsikön uusi tila, ja tästä lähdetään edelleen laskemaan seuraavan vuoden yhteyttämistuotosta. Mallit ovat siten *dynaamisia*: kun metsikön alkutila tunnetaan, voidaan mallin avulla jäljitellä metsikön kasvua vuodesta toiseen (kuva 1).

Koska elintoimintoihin perustuvassa mallissa puun ja metsikön kasvu kuvataan puun fysiologiasta käsin, ja koska mallissa seurataan tapahtumia ajallisena jatkumona, tuloksena on *kausallinen* esitys metsikön kasvusta. Tällainen malli on – ainakin periaatteessa – yleinen ja sovellettavissa hyvin erilaisiin tilanteisiin riippumatta siitä minkälaisissa olosuhteissa mallin parametrit on estimoitu.

Kun elintoimintoihin perustuvat kasvumallit tulivat maataloudesta metsien tutkimukseen 1970-luvulla (Botkin ym. 1972), suomalaiset tarttuivat heti haasteeseen (Hari ym. 1982), ja mallitus kotiutui niin Helsingin ja Joensuun yliopistoon kuin Metlaankin. Tunnustelevan alkuvaiheen jälkeen viime vuosien kehitys on ollut nopeaa sekä meillä että muualla, niin että yksin Euroopassa on nyt toistakymmentä tutkimuskeskusta joissa erilaisten metsien kasvua tutkitaan elintoimintoihin pohjaavien mallien avulla. Vaikka alkuvaiheessa mallitusta ohjasi ehkä eniten halu oppia ymmärtämään metsikköekosysteemin dynamiikkaa, perimmäiset tavoitteet ovat olleet käytännölliset: ennustaa metsikön tuotosta erilaisissa käsittelyissä ja eri kasvupaikoilla. Viime vuosina kehityksen sysäjäjänä on ollut ympäristön muutos ja sen seuraukset metsikköekosysteemien kehitykseen. Uuden ilmiön tutkimuksessa elintoimintoihin perustuva kausaalitarkastelu on tuntunut järkevältä vaihtoehdolta.

Sahatavaran laadun tutkimus on elintoimintoihin



**Kuva 1.** Elintoimintoihin perustuvan dynaamisen mallin toimintakaavio.

perustuvien mallien uusin sovellus, jonka kehittämisessä suomalaiset aukoivat uria 1980-luvulla (Kellomäki ym. 1992). Tämän sovelluksen kehittäminen jatkuu nyt Suomen Akatemian rahoituksella Metlan ja Helsingin yliopiston yhteisessä hankkeessa.

### Puun rakenteen kuvaus elintoimintoihin perustuvissa malleissa

Elintoimintoihin perustuva malli tarvitsee puiden rakenteen kuvausta kolmesta syystä. Ensiksikin yhteyttämistuotteiden laskenta edellyttää tietoa valon varjostumisesta, joka riippuu puiden ja koko metsikön rakenteesta. Toiseksi puun rakenne on

seurausta kasvun jakautumisesta, mutta myös kääntäen: kasvun jakautuminen riippuu rakenteesta. Esimerkiksi pieni latvussuhde vähentää lehvästön potentiaalista kasvuosuutta. Kasvun jakautuminen ohjaa edelleen tulevaa kasvua: mitä enemmän kasvusta ohjautuu lehvästöön, sitä isommaksi tuleva kasvu voi muodostua. Kolmanneksi puut sopeutuvat erilaisiin ympäristöihin, esimerkiksi aluspuun tai valtapuun asemaan, paljolti juuri rakennetaan muuttamalla. Esimerkiksi neulasen pinta-ala painoysikköä kohti muuttuu valosta varjoon. Nämä rakenteelliset muutokset vaikuttavat elintoimintojen tehokkuuteen ja johtavat usein jonkin elintoinnin tehostumiseen kun ympäristöolosuhteet heikkenevät. Tämän takia rakenteellisten sopeutumien ymmärtäminen on tärkeitä elintoimintoihin perustuvissa malleissa.

Koska puun rakenne siis on vuorovaikutuksessa elintoimintojen kanssa, kaikissa elintoimintoihin perustuvissa malleissa metsikön ja puun rakenne on kuvattava jollakin tavalla. Ensimmäiset mallit olivat karkeita: rakenteen kuvaus rajoittui toiminnallisten ositteiden määrittelyyn. Vähimmillään näitä olivat lehdet, juuret ja puuaine. Varjostus kuvattiin olettaen että lehtimassa jakautuu tasaisesti metsikön määrittelemään tilaan. Hiilitaseeseen perustuvan mallin selitysvoimaa kuvaa se, että vaikka oletukset kuulostavat uskalletuilta, niihin perustuvien mallien toiminta kuitenkin heijastaa varsin todenmukaisesti metsiköiden ja puiden dynamiikkaa (McMurtrie ja Wolf 1983).

Seuraava taso rakenteen kuvauksessa on maanpäällisen biomassan korkeusjakauma. Tällaisen mallin avulla pystytään jo varsin hyvin selittämään puiden välistä kilpailua, kun pituuserot ja latvusten keskinäiset korkeussuhteet tulevat mukaan (Mäkelä ja Hari 1986). Kasvun jakautumista korkeussuunnassa on kuvattu sekä Presslerin säännön että putkimallin (Shinozaki ym. 1964) avulla. Putkimallin mukaan rungon mantopuun poikkipinta-ala jollakin korkeudella on suoraan verrannollinen neulasmäärään tämän korkeuden yläpuolella. Presslerin sääntö taas olettaa, että rungon mantopuun poikkipinta-alan kasvu jollakin korkeudella on suorassa suhteessa lehvästön *kasvuun* tämän korkeuden yläpuolella. Liitettyinä elintoimintoihin perustuvaan malliin molemmat säännöt antavat ennusteen runkomuodon kehityksestä ja rungon sisäisestä lusto-

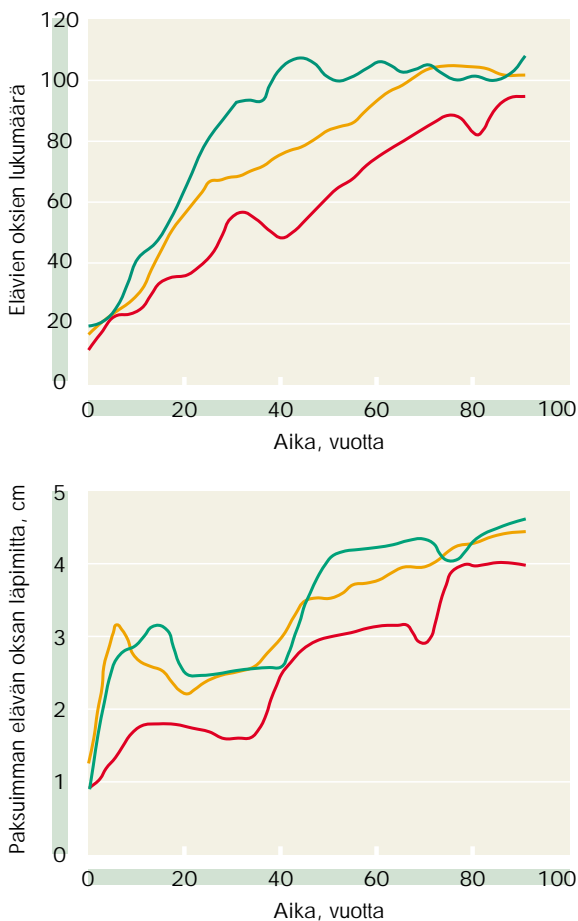
rakenteesta. Putkimalli ennustaa lisäksi mantopuun ja sydänpuun suhteita. Kun samantapaisia sääntöjä sovelletaan oksaston mantopuuhun, päästään ennustamaan myös oksaisuutta (Mäkelä 1997).

Kolmantena rakenteen kuvauksen tasona on elintoimintojen malliin yhdistyvä kolmiulotteinen rakennemalli. Tällaisia malleja on viime vuosina syntynyt nopeasti eri puolille Eurooppaa, kun tietojenkäsittely on tehnyt kolmiulotteisen verso versolta tarkastelun mahdolliseksi (Suomessa Kellomäki ja Strandman 1995, Perttunen ym. 1996). Mallit ovat kuitenkin vasta kehitteillä, eikä niitä ole vielä pystytty soveltamaan kuin yhteen tai muutamaan puuhun kerrallaan, koska versojen määrä ja siten myös tarvittava laskenta-aika kasvaa eksponentiaalisesti puun kasvaessa. Kolmiulotteisella mallilla voidaan kuitenkin periaatteessa jäljitellä puiden rakenteen kehitystä yksityiskohtaisesti. Koska jokainen oksa on kuvattu kolmiulotteisesti, mallin ennusteet soveltuvat automaattisesti sahatavaran oksikkuuden tarkasteluihin.

Laadun kuvaus kausaalisen ja tilastollisen mallin yhdistelmänä

Parhaillaan meneillään olevassa Suomen Akatemian rahoittamassa hankkeessa käytetään puun laadun ennustamisen pohjana elintoimintoihin perustuvaa mallia, jossa puun rakenne on kuvattu korkeusjakaumana putkimallin oletuksien (Mäkelä 1997). Tästä mallista voidaan johtaa yhteyttämis- tuotteiden jakautumisen tuloksena mm. puun runkomuoto, oksien mantopuun ja sydänpuun poikkileikkausalan korkeusjakauma, kiehkuroiden sijainti, latvusrajan korkeus ja sydänpuun jakautuminen. Mallissa on useita erikokoisia puuluokkia, joiden kasvu riippuu siitä, miten muut puut varjostavat niitä. Malli ennustaa myös metsikön itseharvenemista, ja kuolemistodennäköisyys riippuu puun kasvusta ja kasvutilasta. Mallin testausten perusteella tuloksia voidaan pitää ainakin laadullisesti luotettavina ja määrällisestikin suuntaa-antavina, joten sitä voidaan hyvin käyttää apuvälineenä tutkittaessa esimerkiksi kasvatustiheyden vaikutusta puiden kokojakaumaan ja eri kokoluokkien rakenneominaisuuksiin.

Sahatavaran laadun näkökulmasta rungon sisära-



**Kuva 2.** PipeQual-mallilla tehty ennuste oksien lukumäärän ja paksuimman elävän oksan kehityksestä puun iän funktiona tiheään metsikön valtapuussa (oranssi) ja aluspuussa (punainen) ja harvan metsikön valtapuussa (vihreä) (Mäkelä ym. 1997).

kenteessa on tärkeää oksien sijainti, koko ja laatu. Korkeusjakaumiin perustuva malli on kuitenkin vain kaksiulotteinen: vaikka se ennustaa oksien kokonaismäärän kiehkuroittain, se jättää avoimeksi niiden lukumäärän, kokojakauman, sijainnin ja oksakulmat. Näiden ennustaminen elintoimintojen perusteella olisi mahdollista vain kolmiulotteisessa kausaalimallissa, ja todennäköisesti silloinkin realistisuus edellyttäisi ainakin jonkin verran satunnaisuutta.

Nyt puheena olevassa tutkimuksessa kolmiulot-

teinen runko luodaan tilastollisten, satunnaiskomponentteja sisältävien mallien avulla. Näiden reunaehdot – kiehkuran oksien kokonaispinta-ala, vuosikasvaimen pituus, latvusrajan sijainti – saadaan kuitenkin kokonaismallista, jolloin oksisto kytkeytyy koko puun kehitykseen. Oksistomallissa pyritään muutenkin noudattamaan kokonaismallin logiikkaa: kuvataan oksiston dynamiikkaa ja rakennetta sinänsä, ei erityisiä laatumuuttujia. Tämä tekee mallin riippumattomaksi kulloinkin käytössä olevista laatutunnuksista: nämä voidaan johtaa rakenteen kuvauksesta (esim. kuva 2).

Toisin kuin elintoimintoihin perustuva malli, joka laaditaan vakiintuneen biologisen tiedon, hypoteesien ja kohdennettujen kokeiden perusteella, tilastollinen oksikkuusmalli edellyttää edustavaa mitta-usaineistoa. Tarvittavia oksistomittauksia tehdään Metlan tiheyskokeilla, joista on valittu suuri joukko eri-ikäisiä tuoreen kasvupaikan männiköitä. Samalla kerätään biomassa-aineistoja suppeammasta otosjoukosta kokonaismallin testausta varten. Tavoitteena on taata empiirisen aineiston avulla tulosten edustavuus ja luotettavuus, niin että mallin avulla voidaan lopulta tarkastella tietyssä metsikössä, tietyin käsittelyin kasvatettuja runkoja ja niiden sahausta tukeiksi ja tuotteiksi.

### Yhteenveto

Elintoimintoihin perustuvat mallit ovat – pitkälti oman sisäisen logiikkansa perusteella – kehittyneet yhä yksityiskohtaisemman puun rakenteen kuvauksen suuntaan. Tämä mahdollistaa sen, että malleja voidaan soveltaa puun laatutunnusten kehittymisen tarkasteluun. Samalla voidaan hyödyntää elintoimintoihin perustuvien mallien kausaalista ja siten yleistä rakennetta. Tällä hetkellä käytännölläheisin tapa soveltaa malleja laatutarkasteluihin on se, että elintoimintojen malliin yhdistetään oksistoa kuvaavia tilastollisia elementtejä. Kolmiulotteisten toiminnallis-rakenteellisten mallien kehityksessä tulevaisuudessa on mahdollista vähentää empiiristä, aggregoitua malliosiota tältäkin osin. Joka tapauksessa käytäntöön soveltuvuuden tärkeä edellytys on, että tuloksia testataan kattavaa koekellista aineistoa vasten ja mallia korjataan testitulosten perusteella.

## Viitteet

- Björklund, L. 1996. Modelling the interior structure of pine stems. Julkaisussa: Nepveu, G. (ed.). Proceedings IUFRO WP S5.01-04. First Workshop "Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares". Hook, Sweden, June 13–17 1994. Publication Equipe de Recherches sur la Qualité de Bois 1996, July.
- Botkin, D.B., Janak, J.F. & Wallis, J.R. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology* 60: 849–873.
- Hari, P., Kellomäki, S., Mäkelä, A., Ilonen, P., Kanninen, M., Korpilahti, E. & Nygren, M. 1982. Metsikön varhaiskehityksen dynamiikka. Summary: Dynamics of early development of tree stand. *Acta Forestalia Fennica* 177. 42 s.
- Houllier, F., Leban, J.-M. & Colin, F. 1995. Linking growth modelling to timber quality assessment for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 74: 91–102.
- Kellomäki, S., Lämsä, P., Oker-Blom, P. & Uusvaara, O. 1992. Männyn laatukasvatus. *Silva Carelica* 23.
- & Strandman, H. 1995. A model for the structural growth of young Scots pine crowns based on light inception by shoots. *Ecological Modelling* 80: 237–250.
- Mäkelä, A. 1997. A carbon balance model of growth and self-pruning in trees based on structural relationships. *Forest Science* 43(1). (Painossa).
- & Hari, P. 1986. Stand growth model based on carbon uptake and allocation in individual trees. *Ecological Modelling* 33: 205–229.
- , Vanninen, P. & Ikonen, V.-P. 1997. An application of process-based modelling to scenarios of timber quality. *Silva Fennica* (tarjottu julkaistavaksi).
- McMurtrie, L. & Wolf, L. 1983. Above- and below-ground growth of forest stands: a carbon budget model. *Annals of Botany* 52: 437–448.
- Perttunen, J., Sievänen, R., Nikinmaa, E., Salminen, H., Saarenmaa, H. & Väkevä, J. 1996. LIGNUM: A tree model based on simple structural units. *Annals of Botany* 77: 87–98.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. & Kira, T., 1964. A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology* 14: 97–105.
- Tian, X. & Cown, D. 1996. Modelling of wood properties. Paper presented at IUFRO WP S5.01-04. Second Workshop "Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares". Kruger National Park, South Africa, August 26–31, 1996.

■ Kirjoittaja toimii Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksella.