

Olli Tahvonen

# Faustmannin kiertoaikamallista ja sen yleistyksistä



## Johdanto

**F**austmannin (1849) kiertoaikamalli on yksinkertaisin mahdollinen kuvaus taloudellisesti tehokkaasta puuntuotannosta eli puuntuotannon taloudellisen ylijäämän tai voiton maksimoinnista. Malli yhdistää taloudellisen optimoinnin ja biologisen kuvauksen metsästä uusiutuvana luonnonvarana ja on tunnettu monilla metsätutkimuksen aloilla kuten metsäekonomiassa ja -ekologiassa sekä metsänarvioimis- ja metsänhoitotieteissä. Myös kansantaloustieteessä mallin investointiteoreettista kuvausta pidetään ainutkertaisena.

Faustmannin mallia on Suomessa usein pidetty metsätutkimuksen historiaan liittyvänä irrallisena kuriositeettina, jolla ei ole tieteellistä eikä käytännön merkitystä. Kuitenkin, jos puuntuotantoa pidetään taloudellisenä toimintana, ja tarkasteluun sisällytetään puustojen ikäluokat, ei Faustmannin mallia, tai jotain sen yleistystä, voida mitenkään välttää. Malli sisältyy esimerkiksi Sedjon ja Lyonin (1990) globaaleja metsämarkkinoita kuvaavaan ennustemalliin samoin kuin MELA-ohjelmistoon. Tarkastelen lyhyesti mallin luonnetta, sen yleistyksiä ja suomalaisten olosuhteiden kannalta relevanttia keskustelua ja tutkimusta.

## Klassisen kiertoaikamallin prototyyppi

Yksinkertaisimmillaan ja ilman harvennuksia kiertoaikamalli voidaan esittää muodossa

$$\max_s V = \sum_{i=0}^{\infty} (px(s)e^{-rs} - w)e^{-irs} \quad (1)$$

missä  $s$  on puuston (metsikön) päätehakkuuikä,  $V$  on paljaan maan arvo,  $p$  on puun markkinahinta,  $x$  ilmaisee hyödynnettävien puukuutioiden määrän funktiona puuston iästä,  $r$  on markkinakorko ja  $w$  on istutuskustannukset ( $px(s)$ :n sijaan voidaan kirjoittaa  $V(s)$ , jos halutaan ilmaista puun hinnan riippuvuus esim. järeydestä). Alkuhetkellä metsämaa on tyhjä, joten ensimmäisestä puusukupolvesta saatavan nettotuloksen nykyarvo on  $px(s)e^{-rs} - w$ . Seuraavista sukupolvista saatavat tuotot ja kustannukset syntyvät aina yhtä kiertoaikaa kauempana tulevaisuudessa ja ne on kerrottava diskonttotekijällä  $e^{-irs}$ . Ottamalla huomioon, että

$$\sum_{i=0}^{\infty} e^{-irs} = 1/(1 - e^{-rs}),$$

voidaan optimaalinen kiertoaika määrittellä asettamalla  $V$ :n derivaatta  $s$ :n suhteen nolaksi:

$$p \frac{dx(s)}{ds} - rpx(s) - r(px(s)e^{-rs} - w)/(1 - e^{-rs}) = 0 \quad (2)$$

Puusto kannattaa mallin mukaan kaataa kun arvokasvu on yhtä suuri kuin pystyssä olevaan puusukupolveen ja metsämaahan sitoutuneeseen pääomaan liittyvät korkokustannukset.

## Mallin ominaisuuksia

Yhtälön (2) nojalla optimikiertoaika on sitä lyhyempi mitä korkeampi on markkinakorko ja puun hinta ja mitä alhaisemmat ovat istutuskustannukset. Nämä mallin ominaisuudet voidaan tulkita empiirisesti testattaviksi pitkän aikavälin tarjontaa koskeviksi hypoteeseiksi. Puun vuotuinen tarjonta annetulla maapinta-alalla on

$$x(s_*(p, r, w)) / s_*(p, r, w) \equiv h \quad (3)$$

missä  $s_*(p, r, w)$  on optimikiertoaika funktiona mallin parametreista. Derivoimalla (3) esimerkiksi  $p$ :n suhteen saadaan

$$\partial h / \partial p = \partial s_* / \partial p (s_* dx / ds - x(s_*)) / s_*^2 \quad (4)$$

josta voidaan päätellä, että pitkän aikavälin pysyvä nousu puun hinnassa alentaa puun tarjontaa, jos kiertoaika on lyhyempi kuin fyysisen puutuotannon maksimoiva kiertoaika (eli  $s_* dx / ds - x(s_*) > 0$ ), ja kasvattaa tarjontaa päinvastaisessa tapauksessa.

Yhtälö (4) määrittelee puun pitkän aikavälin tarjontakäyrän. Tarjonta kasvaa hinnan funktiona hinnan ollessa alhainen, kun taas korkeammalla hintatasolla hinnan nousu alentaa tarjontaa. Tämä normaaleista taloudellisista malleista poikkeava ominaisuus seuraa metsän biologiasta ja mallin sisältämästä pääomateoreettisesta näkökulmasta. Vastava mahdollisuus sisältyy lähes kaikkiin uusiutuvia luonnonvaroja kuvaaviin taloudellisiin malleihin. Hinnan ollessa korkea ovat kasvavaan puustoon sitoutuneet pääomakustannukset korkeat ja puusto kannattaa kaataa ennen kuin se saavuttaa fyysisen tuotoksen maksimoivan kiertoajan. Malliin voidaan lisätä tuotantopanoksia kuten lannoitus, ja metsämaan pinta-ala voidaan ottaa huomioon endogeenisenä, jolloin pitkän aikavälin tarjontafunktio voi olla nouseva. Klassinen kiertoaikamalli kuvaa myös puun lyhyen aikavälin tarjontaa. Koska puun pysyvä hinnan nousu lyhentää kiertoaikaa, reagoivat metsänomistajat hinnan nousuun päätehakkamalla liian vanhoiksi jääneet puustot, eli lyhyellä aikavälillä hinnan nousu lisää tarjontaa. Hinnan nousun täsmällinen vaikutus riippuu puustojen ikäluokkajakaumasta.

Kun optimikiertoaika sijoitetaan paljaan maan

arvon lausekkeeseen saadaan maksimoitu paljaan maan arvo, ja vastaavasti metsämaan arvo  $t$  vuotta uudistamisen jälkeen on  $e^{rt}(V + w)$ . Metsämaan arvo on suurin hinta, joka metsämaasta kannattaa markkinoilla maksaa, ja toisaalta alhaisin hinta, jolla metsämaa kannattaa myydä. Kiertoaikamalli tuottaa näin ennusteen metsämaan markkinahinnalle. On myös huomattava, että  $V$  voi olla negatiivinen. Tämä merkitsee sitä, että jos uuden puuston kasvu edellyttää välttämättä  $w$ :n suuruisia kustannuksia, perustetaan uusi puusto vain, jos laki sitä vaatii, eikä siksi, että se olisi puuntuotannollisesti kannattavaa. Jos metsämaamarkkinat toimivat rajoituksetta ja uuden puuston perustamispakkoa ei ole, markkinat sopeuttavat puun hinnan ja puuntuotantoon allokoitun maapinta-alan siten, että negatiivista maan arvoa ei esiinny. Suomessa nämä ehdot eivät täyty. Kritiikkiä on aiheuttanut mallin ääretön aikahorisontti. Suomessa ihmiset ovat metsänomistajina keskimäärin 31 vuotta. Kuitenkin, jos metsämaamarkkinat toimivat rajoituksetta, metsänomistajan kannattaa huomioida mahdollisuus myydä metsä milloin tahansa. Koska myynnissä saatava hinta riippuu puuston iästä, metsänomistajan kannattaa soveltaa ääretöntä suunnitteluhorisonttia heijastavaa kiertoaikaa. Toisaalta metsä voidaan jättää perinnöksi. Tämäkin johtaa asetelmaan, jossa metsänomistajan kannattaa toimia ikäänkuin suunnitteluhorisontti olisi ikuinen (Tahvonen 1998). Lisäksi mallista voidaan helposti tehdä yksinkertainen muunnos, jossa horisontin pituus on mikä tahansa äärellinen ajanjakso.

Suomessa on kiertoaikoja laskettu soveltaen mm. ”rajakannattavuuskriteeriä” (Nyyssönen 1958). Ajatuksena on välttää ”epärealistinen diskonntaus” ja valita kiertoaika normaalimetsässä siten, että vuotuisen nettokantorahatulon ja normaalimetsään sitoutuneen pääoman korkokustannusten erotus on suurin. Sitoutunut pääoma lasketaan kertomalla eri ikäluokissa olevat puutavaralajit niiden välittömässä myynnissä saatavilla hinnoilla. Näin saadut kiertoajat ovat ilmeisesti ohjanneet käytännön metsäsuunnittelua (Kuusela 1999, s. 240–). Rajakannattavuuskriteeri perustuu kuitenkin yksiselitteisen virheelliseen tapaan laskea normaalimetsään sitoutunut pääoma. Tämä havainnollistuu esim. siinä, että nuoret taimikot, joissa ei ole välittömästi realisoitavaa puuta, tullaan luokitelleeksi arvottomiksi. Jos

normaalimetsään sitoutunut pääoma lasketaan oikein, antaa rajakannattavuuskriteeri Faustmannin mallin mukaisen tuloksen.

### Kiertoaikamallin laajennuksista

Faustmannin mallin klassinen versio on voimakas yksinkertaistus jota on lukuisissa tutkimuksissa yleistetty. Malliin sisältyvät taloudelliset muuttujat voidaan olettaa ajassa muuttuviksi (Chang 1998). Jos puun hinnan annetaan muuttua suhdannevaihteluiden tapaan, saattaa tämä dominoida lähes kaikki muut vaikutukset optimikiertoaikaan (Kuuluvainen ja Tahvonen 1999). Puun kasvu tai taloudelliset muuttujat voidaan olettaa stokastisiksi (Willasen 1998). Eksogeenisen hinnan sijaan mallissa voi olla puun kysyntää kuvaava markkinakysyntäkäyrä (Mitra ja Wan 1986). Malli voi sisältää puun epälineaariset korjuukustannukset (Heaps 1984) ja pääomamarkkinat voivat olla epätäydelliset (Tahvonen, Salo, Kuuluvainen 1999). Metsällä voi olla muuta kuin puunuotannollista arvoa (Hartmann 1976). Malliin voidaan sisällyttää metsikön kasvusimulaattori ja optimoida kiertoajan lisäksi myös harvennukset (Valsta 1993).

Suomalaisesta näkökulmasta on kiinnostavaa pohdita miten Faustmannin malli soveltuu olosuhteisiin, joissa noin 80 % puun tarjonnasta on peräisin yksityismetsänomistajilta. Klassisen mallin ja sen tyyppillisten yleistysten ongelmana on, että empiirisesti puun tarjonta riippuu malliin sisällyttämättä metsänomistajakohtaisista tekijöistä. Tämä seuraa reaali maailman epätäydellisistä metsämaa- ja pääomamarkkinoista, päätöksenteon epävarmuudesta ja ympäristöarvostuksista. Suomalaisen metsäekonomin johtopäätös on ollut, että kiertoaikamallista on luovuttava ja siirryttävä ns. kahden periodin metsämalliin, johon on yksinkertaisempaa sisällyttää ”epätäydellisyyksiä” ja monipuolisempi kuvaus metsänomistajan taloudesta. Lähes kaikki suomalaisten ekonomistien julkaisema metsäekonominen tutkimus ja väitöskirjat ovat keskittyneet kahden periodin malliin (Koskela 1989, Kuuluvainen 1989, Ovaskainen 1992, Pajujoja 1995, Ollikainen 1996). Alan kirjallisuus sisältääkin kiinnostavan, monipuolisen ja pitkälle viedyn kuvauksen mallin mahdollisuuksista. Näissä tutkimuksissa metsän kasvu ku-

vataan yhtälöllä

$$x_{t+1} = x_t - h_t + g(x_t - h_t) \quad (5)$$

missä  $x_t$  on metsävarojen määrä periodilla  $t$ ,  $h_t$  hakkuut periodilla  $t$  ja funktio  $g$  kuvaa metsävarojen kasvua funktiona metsävarojen määrästä ( $m^3$ ). Tämä kuvaus sivuuttaa metsikön kasvun ja iän, tai metsälön kasvun ja ikäluokkajakauman väliset riippuvuudet. Yhtälön (5) kuvaus johtaa asetelmaan, jossa metsävarojen käyttö on ikäluokattoman biomassan korjuuta. Nämä mallit eivät kuvaa kiertoajan määräytymistä eikä niitä voida kiertoaikamallien tapaan soveltaa empiirisesti metsänhoitotoimenpiteiden edullisuus- ja optimointitarkasteluihin tai metsämaan arvon laskentaan. Kun useissa kahden periodin malleissa oletetaan että kasvufunktio  $g$  on monotonisesti kasvava, syntyy vaara, että metsävaroihin liittyvät biologiset piirteet saavat hyvin vähäisen roolin. Joukko tunnettuja taloustieteilijöitä kahdensadan vuoden ajalta onkin pitänyt juuri metsien kiertoaikaan liittyviä kysymyksiä talusteoreettisesti ainutlaatuisina (J. von Thünen, S. Jevons, I. Fisher, J. Wicksell, B. Ohlin ja P. Samuelson). Tästäkin näkökulmasta voidaan kysyä onko suomalaisten ekonomistien lähes täydelliseen suuntautumiseen pois kiertoaikamallista löydettävissä vaihtoehtoja.

On osoittautunut, että dynaamisen optimoinnin metodeilla myös kiertoaikamalli on yleistettävissä sisältämään rikkaampi kuvaus yksityismetsänomistajan taloudesta ja markkinoiden epätäydellisyyksistä. Tämä näyttää muuttavan suuren osan Faustmannin mallin tuloksista toiseksi. Kiertoaika määrittyy epälineaarisen differenssiyhtälön avulla, jonka kertaluku riippuu tarkastelussa mukana olevien metsiköiden tai puustojen määrästä. Kiertoaika ei yleisesti ottaen ole ajassa vakio kuten klassisessa Faustmannin mallissa. Eri metsiköiden kiertoajat ovat keskinäisessä riippuvuussuhteessa, ja koko metsälön käsittelyohjelma on sidoksissa metsänomistajakohtaisiin tekijöihin kuten varallisuuteen, aikapreferenssiin, ikään ja mahdollisiin ympäristöarvostuksiin. Yleistyksissä voidaan tutkia milloin annettu ikäluokkajakauma kannattaa muuntaa normaalimetsäksi. Myös metsämaan arvoa koskevat tulokset muuttuvat oleellisesti toiseksi. Pääomamarkkinoiden epätäydellisyyksien seurauksena saatavat taloudelliset kannustimet uudistamiselle puut-

tua vastoin Faustmannin klassisen mallin ennustetta (Tahvonen 1998, Tahvonen ja Salo 1999 ja Tahvonen, Salo ja Kuuluvainen 1999).

## Keskustelua

Suomessa kiertoaikamallin kehittäminen on usein laiminlyöty ilman, että olisi esitetty vastaavien kysymysten tarkasteluun soveltuvaa vaihtoehtoa. Kiertoaikamalli on usein sivuutettu väitteillä ettei se tuota ”oikeaa kiertoaikaa” tai että se perustuu ”epärealistiseen diskonttaukseen”. Samalla ei kuitenkaan esitetä tieteellisesti perusteltua tapaa johtaa ”oikea kiertoaika” tai esitetä uutta teoriaa pääomamarkkinoista, jonka perusteella korkokustannukset voitaisiin unohtaa. Väite, että kiertoaikamalli sopisi vain valtionmetsiä koskevaan päätöksentekoon ja että yksityismetsänomistajia olisi kuvattava kahden periodin mallilla, ei mm. ota huomioon kiertoaikamallin lukuisia yleistysmahdollisuuksia.

Monet puuntuotannon ekonomian suomalaisiin olosuhteisiin liittyvät kysymykset esitetään metsäneuvonnan opaskirjoissa ja osassa tutkimustakin varsin omintakeisesti. Mielikäisen (1997) mukaan metsänkäsittelyyn liittyvät talouslaskelmat näyttäsivät olevan mielivaltaisia, koska niillä voidaan perustella lähes mikä kiertoaika tahansa, ja on jotakuinkin samantekevää pyrkiä metsänomistaja maksimoimaan kuutiotuottoa ja otetaanko laskelmissa korkokanta huomioon vain ei. Metsämaan arvon määrittämisessä käytettävän laskentakoron esitetään riippuvan metsän kasvuominaisuuksista (Oksanen-Peltola 1997). Kuuselan (1999, s. 240–) metsäekonominen ajattelu näyttäisi nojaavan väärinkäsityksiä tuottavaan sisäisen koron laskentaan ja siihen, että kansantalouden näkökulmasta oikea korkoprosentti olisi nolla. Joissain tutkimuksissa korkokantaa pidetään parametrina, jota voidaan ”justeerata” laskennan lopputulosten sopivuusnäkökulmasta (Hirvelä ym. 1999). Hannelius (1997) mm. esittää, että metsäekonomisten laskelmien korkoprosentti voitaisiin valita sen mukaan kuinka paljon metsätalous tyypillisesti tuottaa. Nämä ja muut vastaavat käsitykset ohjaavat päätöksentekoa ja tutkimusta, vaikka ne ovat mielivaltaisia eikä niiden tueksi ole esitettävissä tieteelliset kriteerit täyttävää tutkimusta. Puuston optimikiertoajoista eri puulajeille ja kasvu-

paikoille on varsin vähän tutkimuksia, vaikka kiertoaikoja Suomessa rajoitetaan lakiteitse. Suomessa ei myöskään ole käytössä markkinatasoisia puun kysyntä- ja tarjontamalleja, joissa puun hinta määräytyy endogeenisesti ja puun tarjonta riippuu metsien ikäluokkarakenteesta. Esimerkiksi Mela-laskelmissa puun hinnan määräytyminen sivuutetaan keinotekoisilla tasaisuusrajoitteilla. Metsäekonomisen tietämyksen taso on huolestuttava niin teollisuuden kuin ympäristönsuojelun, mutta erityisesti yksityismetsänomistajien kannalta, joiden käyttäytyminen kouriintuntuvimmin paljastaa, että puuntuotannossa on kysymys taloudellisesta toiminnasta. On vaikea ymmärtää kuinka suomalaisessa metsäpolitiikassa ja -tutkimuksessakin ilmenevä tendenssi sivuuttaa metsien käyttöön liittyvä taloustieteellinen näkökulma ja tutkimus voisi koitua yhteiskunnan tai metsäsektorin hyödyksi.

## Kirjallisuus

- Chang, S. 1998. A generalized Faustmann model for the determination of optimal harvest age. *Canadian Journal of Forestry* 28: 652–659.
- Faustmann, M. Berechnung des Wertes welchen Waldboden sowie noch nicht haubare Holzbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 15: 441–455.
- Hannelius, S. 1997. Kannattavuuden kriteerit. Julkaisussa: Mielikäinen, K. & Riikilä, M. (toim.). Kannattava puuntuotanto. Gummerus, Jyväskylä. s. 21–23.
- Hartmann, R. 1976. The harvesting decision when a standing forest has value. *Economic Inquiry* 4: 52–58.
- Heaps, T. 1984. The forestry maximum principle. *Journal of Economic Dynamics and Control* 7: 116–134.
- Hirvelä, H., Nuutinen, T. & Salminen, O. 1999. Valtakunnan metsien 9. inventointiin perustuvat hakkuumahdollisuusarviot vuosille 1996–2025 Keski-Suomen ja Pohjois-Savon metsäkeskusten alueilla. *Metsätieteen aikakauskirja* 2B/1999: 289–307.
- Koskela, E. 1989. Forest taxation and timber supply under price uncertainty: credit rationing in capital markets. *Forest Science* 35: 160–172.
- Kuuluvainen, J. 1989. Nonindustrial private timber supply and credit rationing. *Sveriges Lantbruksuniversitet, Rapport 85. Väitöskirja*.
- & Tahvonen, O. 1999. Testing forest rotation model: evidence from panel data. *Forest Science*. Painossa.

- Kuusela, K. 1999. Metsän leiviskät. Atena, Jyväskylä.
- Mielikäinen, K. 1997. Metsän kasvattaminen. Julkaisussa: Tapion taskukirja. Metsälehtikustannus, Jyväskylä. s. 204–215.
- Mitra, T. & Wan, H. 1986. On the Faustmann solution to the forest management problem. *Journal of Economic Theory* 40: 229–249.
- Nyysönen, A. 1958. Kiertoaika ja sen määrittäminen. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 49.
- Oksanen-Peltola, L. 1997. Metsän arvon määrittäminen. Julkaisussa: Tapion taskukirja. Metsälehtikustannus, Jyväskylä. s.437–456.
- Ollikainen, M. 1996. Essays on timber supply and forest taxation. *Vatt- tutkimuksia* 33, Helsinki. Väitöskirja.
- Ovaskainen, V. 1992. Forest taxation; timber supply, and economic efficiency. *Acta Forestalia Fennica* 233. Väitöskirja.
- Pajuoja, H. 1995. Kulutus ja hakkuukäyttäytyminen kirjanpitolioilla. Helsingin yliopiston metsäekonomian laitoksen julkaisu 3. Väitöskirja.
- Samuelson, P. 1976. Economics of forestry in an evolving society. *Economic Inquiry* XIV: 466–492.
- Sedjo, R. & Lyon, K. 1990. The long-term adequacy of world timber supply. *Resources for the Future*, Washington, D.C.
- Tahvonen, O. 1988. Bequest, credit rationing and in situ values in the Faustmann-Pressler-Ohlin forestry model. *Scandinavian Journal of Economics* 100: 781–800.
- & Salo, S. 1999. Optimal forest rotation with in situ preferences. *Journal of Environmental Economics and Management* 37: 106–128.
- , Salo, S. & Kuuluvainen, J. 1999. Forest rotation periods and land values under borrowing constraint. *Journal of Economic Dynamics and Control*. Painossa.
- Valsta, L. 1993. Stand management optimization based on growth simulators. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 453. Väitöskirja.
- Willasen, T. 1998. The stochastic rotation problem: a generalization of Faustmann's formula to forest growth. *Journal of Economic Dynamics and Control* 22: 573–596.
- Olli Tahvonen (olli.tahvonen@metla.fi) on Metsäntutkimuslaitoksen ympäristötaloustieteen professori.